

**Tesis Monográfica para optar al Título de
Ingeniero Eléctrico**

Título

**“DISEÑO E IMPLEMENTACION DE VARIADORES DE FRECUENCIA EN
MAQUINAS EXTRUSORAS DE PLASTICO PARA MEJORAR LOS
PROCESOS Y AHORRAR ENERGIA EN LA EMPRESA PLASTINIC SA”.**

Autores:

- Br. Mario Josué Gutiérrez Martínez 2011-37786
- Br. Mario Alberto Ruiz Moreno 2010-33078

Tutor:

Ing. Juan González Mena

Managua, Enero 2017

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	Introducción	5
II.	Antecedente	7
III.	Planteamiento de la Situación.....	8
IV.	Objetivos del Estudio.....	9
a.	Objetivo General	9
b.	Objetivo Específico	9
V.	Justificación	10
VI.	Marco Teórico	12
1.	Proceso de extrusión.....	12
2.	Sistema actual de la extrusora.....	12
3.	Variadores de frecuencia	14
3.1	Conceptos y definiciones básicas	14
3.2	Ventajas y desventajas de uso del variador.....	16
3.3	Desventajas	17
3.4	Conceptos básicos sobre variadores para motor trifásico.....	18
3.5	Ahorro de energía relacionado con la utilización de VDF	21
4.	Motores de corriente alterna	23
VII.	Metodología de Trabajo	28
VIII.	Métodos para variar la velocidad en motores trifásicos de corriente alterna	30
IX.	Característica dinámica de los accionamientos eléctricos.....	39
X.	El convertidor de frecuencia	40
XI.	Sistema eléctrico actual	46
XII.	Sistema eléctrico propuesto.....	48
1.	Diagrama de instalación del variador de frecuencia por EATON	51
2.	Variadores de frecuencia para la extrusora de plástico	52
3.	Ahorro energético que se consigue con la aplicación de un VDF	58
XIII.	Análisis de problemas potenciales	59
XIV.	Conclusiones	66
XV.	Bibliografía	67

LISTA DE ABREVIACIONES

RPM	Revoluciones por minuto.
VDF	Variador de frecuencia
V	Voltio
Hz	frecuencia
Ns	velocidad síncrona rpm
P	Potencia
VCA	Voltaje de corriente alterna
W	Vatios
Hp	Potencia

Listas de figuras

Figura 1: diagrama de entrada y salidas de un VDF	14
Figura 2: diagrama de bloques de un VDF	15
Figura 3: rampa de velocidad de un VDF	19
Figura 4: Curva par-velocidad para par constante	20
Figura 5: Clasificación de los motores	23
Figura 6: Motor síncrono curva de régimen	25
Figura 7: Control de velocidad por relación de voltaje de línea	31
Figura 8: Devanado estáticos de dos polos para cambio de polos	32
Figura 9 : Devanado de 2 a 4 polos mediante polos consecuentes	33
Figura 10: Control de velocidad mediante variación de la resistencia del rotor	36
Figura 11: Curva característica U/F	37
Figura 12: Curva característica por variación de frecuencia	38
Figura 13: Esquema de un convertidor de frecuencia	40
Figura 14: Tipos de convertidores de CA a CC	41
Figura 15: Inversor a base de SCR's	42
Figura 16: Inversor a base de IGBT's	43
Figura 17: Diagrama de fuerza y diagrama de mando	46
Figura 18: Termografía realizada a los elementos eléctricos.	47
Figura 19: Ventajas y desventajas de los métodos para variar la velocidad	50
Figura 20 : diagrama de VDF	51
Figura 21: Diagrama de fuerza del sistema eléctrico propuesto	52
Figura 22: Grafico comparativo métodos de arranque de motores trifásicos asíncronos jaula de ardilla.	54
Figura 23: Propuesta de ahorro esperado	56
Figura 24: Triangulo de potencias	56
Figura 25: Límites de compatibilidad: Armónicos de tensión (Un%)	62

I. Introducción

En la actualidad el uso de variadores de frecuencia o variadores de velocidad se ha vuelto necesario en las máquinas de extrusión, tal es el caso de la industria del plástico donde se ha hecho necesario mejorar los procesos de productividad y la eficiencia del proceso.

Estos procesos de diferentes tipos de materiales plásticos y compuestos se conocen como proceso de extrusión, donde se moldea, se funde, se forma y maquinan como formas complejas, mediante la acción mecánica de un extrusor de tornillo.

Desde el punto de vista de los plásticos, la extrusión es claramente uno de los procesos más importantes de transformación. Estos procesos de extrusión de plásticos se llevan a cabo en máquinas denominadas extrusoras o extrusores.

Pues la principal desventaja de estos motores de las extrusoras en sus diseños más antiguos era que no se tenía un control capaz de regular la velocidad de forma óptima.

Por lo tanto se hace necesario en estos procesos de extrusión de materiales, variar la velocidad ya que es un método que permite mantener una calidad determinada para un producto, y la potencia demandada se podrá racionalizar de la misma forma.

A medida que la electrónica avanza y la generación de energía es cada vez más costosa, se torna rentable y necesario hacer cada vez más eficientes los procesos de producción, éste es el caso de aquellos procesos que involucren máquinas extrusoras y que haciendo uso de los controles de frecuencia (variadores) pueden ser más eficientes y por lo tanto ahorrar energía.

Los sistemas de velocidad variable se pueden aplicarse en aquellos procesos donde se requiera regular el flujo a diferentes cargas.

Partiendo de la premisa de que al tener un mayor consumo de corriente se está demandando mayor potencia, se hace necesario regular el consumo energético, puesto que no solamente se tiene un impacto económico, sino también social porque afecta el medio ambiente de forma directa debido a que la generación se hace a base de carbón en la mayor parte de los casos.

Al mismo tiempo de busca automatizar parte de los procesos, es obvio que existen varias maneras de lograr este propósito y una de ellas es con la aplicación de los variadores de frecuencia como habíamos mencionado.

Por tanto el control automático de los procesos en la actualidad es una disciplina que se ha desarrollado con una velocidad igual a la de la tecnología, la misma que tiene avances día con día; una de las razones por las que las empresas dudan mucho en automatizar sus procesos, es que los dispositivos que ofrecen este beneficio tienen costos elevados.

Por lo que tienen la necesidad de buscar alternativas que les proporcionen los mismos beneficios y características a un costo módico, la aplicación de variadores de frecuencia en los procesos de la industria representa algunas ventajas para las empresas que deciden hacerlo una de ellas es el ahorro en el consumo de energía, el mismo que se ve reflejado en la economía de las mismas.

El estudio busca proponer un modelo para la automatización y el control de una máquina extrusora que proporcione información y brinde gobernabilidad sobre los distintos parámetros del proceso, para mejorar aspectos como la operatividad de la máquina, la flexibilidad en el manejo de materias primas y la adecuación de sus condiciones de trabajo.

Ya que la máquina en su estado actual no logra este objetivo, es necesario realizar el control de los parámetros de temperatura y velocidad de extrusión que permitirá caracterizar y estandarizar los procesos de producción de materiales plásticos y la reproducción de procesos extrusores para los perfiles deseados. Además se pretende alcanzar un ahorro significativo en el consumo de energía eléctrica.

II. Antecedente

Actualmente la empresa ejecuto una serie de medidas entre ellas el balanceo de cargas eléctricas en los paneles de distribución, y arranque estrella –Delta en motores.

Con el sistema arranque estrella–Delta se redujo la corriente en el momento del arranque al alimentar a una tensión menor $U_n/\sqrt{3}$. Con ello se consigue que la intensidad baje a una tercera parte de la intensidad que se produciría en un arranque directo.

También el par de arranque se reduce a menos de la mitad, lo que hace imposible este sistema en motores de media potencia que arranquen con carga. Otro inconveniente es el corte de tensión que se produce al pasar de estrella–Delta.

A pesar de todos estos cambios el consumo de energía reactiva en el sistema está presente por lo que es necesario buscar un método de ahorro de energía.

Otro aspecto importante es sobre la calibración del grosor del plástico se hace de manera mecánica, ya que no se tiene un control sobre la velocidad de extrusión para moldear adecuadamente el grosor en mm del mismo, por lo tanto los mantenimientos a estas máquinas son periódicos, deteniendo así la producción.

III. Planteamiento de la Situación

En la actualidad las extrusoras producen diferentes tipos de grosor de plástico en el orden de los mm. Para accionar la misma se usan motores que superan los 30KW de potencia con una velocidad nominal de 1185 rpm en promedio, el arranque se realiza utilizando el método estrella-triángulo, el cual se ha venido usando desde mucho tiempo, ya que la maquinaria de la industria de plástico es bastante obsoleta, trayendo consigo alto consumo energético, desgaste mecánico en boquillas, ejes, piñones y rodamientos.

El resultado por el cual estos elementos mecánicos sufren desgaste es que la variación de velocidad existente no ofrece los rangos necesarios para normalizar los esfuerzos presentes en el proceso.

Estas máquinas como se expuso en los párrafos anteriores son accionada con motores eléctricos que superan los 30kW de potencia, tienen un consumo nominal de corriente de 60 Amperios, la gran mayoría de los motores en el arranque consume de 4 a 7 veces su corriente nominal, este puede darse en promedio 6 veces al día, acarreando un mayor consumo de potencia activa y reactiva.

El motor eléctrico durante la jornada laboral trabaja a máxima potencia, sin importar el tipo del grosor de plástico que se esté elaborando, cuando es de grosor de 2mm es de menor área de salida los esfuerzos que se presentan son mayores y causa que la maquina requiera más potencia para extruir la misma cantidad másica, en el caso contrarió cuando se utiliza mayor grosor el área de salida de la maquina requiere menor potencia de extrusión y menor esfuerzo puesto que el área de salida de la boquilla es mayor y el plástico puede fluir con mayor facilidad requiriendo menos potencia y por lo tanto menos consumo de energía.

De lo expuesto anteriormente se presenta la necesidad de implementar dispositivos que permitan regular la velocidad.

IV. Objetivos del Estudio

a. Objetivo General

- Diseñar e implementar el uso de variadores de frecuencia en maquinas extrusoras de plástico para mejorar los procesos y ahorro energía en la empresa Plastinic SA

b. Objetivo Específico

- Diseño del nuevo sistema eléctrico utilizando variadores de frecuencia en las maquinas extrusoras.
- Estudiar y proponer un diseño para la automatización y control de la máquina extrusora.
- Conocer la estructura y características de los variadores de frecuencia.
- Analizar las ventajas y desventajas del uso de variadores de frecuencia.
- Calcular el posible ahorro de energía al implementar el uso de variadores de frecuencia.

V. Justificación

El mayor porcentaje de la energía eléctrica demandada en la industria se utiliza en motores, las aplicaciones industriales en las que se necesita una variación de velocidad continua y progresiva son cada vez más frecuentes, estas aplicaciones pueden ser: rapidez de respuesta, precisión, robustez y disponibilidad, entendiendo esta última como la facilidad intrínseca del equipo en reducción de paradas programadas para revisiones de mantenimiento preventivo.

Por lo tanto el principal objetivo del presente estudio es aprovechar las ventajas que proporcionan los variadores de frecuencia, y conocer las posibilidades que brindan dichos dispositivos para reducir costos en varios aspectos en la industria; además de poder controlar la frecuencia de alimentación de un motor de CA a voluntad de las necesidades que se presenten en un proceso

Implementar un sistema de regulación de velocidad es una de las soluciones más eficientes para mejorar el proceso, pues en la tecnología de regulación de velocidad se obtienen reducciones en consumo de los motores que puedan alcanzar el 50% y mejoras en el control operativo que optimizan la rentabilidad y productividad de los procesos, a la vez minimizan las pérdidas en instalaciones ya que los equipos demandaran de la red menores potencias en cualquier régimen de trabajo incluso en el arranque.

La utilización de motores de alto rendimiento junto con los equipos de regulación de velocidad alcanza una considerable mejora en el rendimiento energético de la operación, sin menospreciar el perfeccionamiento de los productos elaborados.

Hasta el momento se ha mencionado y plasmado la justificación del porque efectuar la regulación de velocidades de los motores que accionan las extrusoras, pero ¿cuál es la mejor manera? y ¿cuáles son los métodos más eficientes de regulación de velocidad?

Existen diferentes formas de regular la velocidad bien sea por medios mecánicos, eléctricos y electrónicos; en la actualidad el método más eficiente es el electrónico, donde han incursionado los convertidores de frecuencia los cuáles presentan muchas ventajas en comparación con los otros métodos de regulación de velocidad.

Un convertidor de frecuencia es un regulador de velocidad que gracias al progreso experimentado por la electrónica de potencia ha permitido manejar potencias que abarcan desde algunos vatios hasta varios megavatios, permitiendo así satisfacer todas las necesidades planteadas en sus diversas aplicaciones industriales.

Este dispositivo realiza una conversión óptima de la energía, regulando la velocidad al hacer variar la frecuencia de operación del motor, como la variación no se hace por debilitamiento de campo, el torque ofrecido por este no disminuye significativamente.

Además estos equipos innovadores ahorran en mantenimiento al conseguir que los motores trabajen en todo momento en las mejores condiciones con resultados más satisfactorios; también garantizan un uso racional de los motores prologando su vida de utilización y consiguiendo rendimiento máximo en cualquier régimen de trabajo.

Este mantenimiento no se refiere solamente al motor sino también afectara a las transmisiones, embragues y elementos de relación.

Se tiene un mayor control en el proceso de fabricación porque el arranque y las paradas se realizan con rampas de aceleración y desaceleración, trayendo consigo menores esfuerzos y por lo tanto menores desgastes en los elementos mencionados en el párrafo anterior.

VI. Marco Teórico

A continuación se describirán algunos conceptos relevantes que permitirán comprender el estudio actual, que son indispensables para el cumplimiento de los objetivos planteados del estudio.

1. Proceso de extrusión

Los termoplásticos o películas de polietileno se fabrican utilizando la extrusora, una máquina industrial que procesa estos materiales. La materia prima en forma de granos pequeños se introduce por un embudo en un cañón calentado, donde un cilindro con rosca de tornillo la transporta a lo largo del tubo.

El material se va fundiendo, por lo que ocupa menos espacio, y va saliendo por un extremo. Posteriormente, la fabricación del plástico se completa mediante dos procesos: la extrusión combinada con soplado y el moldeo con inyección a presión.

2. Sistema actual de la extrusora

➤ Objetivo, sistemas y modo de funcionamiento

El objetivo de producción de la máquina es la producción de perfiles tubulares de plástico y peletizado. Se cuenta con 4 sistemas que se encargan del proceso de extrusión, estos son:

- Sistema de extrusión del perfil tubular
- Sistema de enfriamiento del perfil tubular
- Sistema de halado
- Sistema de peletizado

El modo de funcionamiento de la máquina comienza cuando la materia prima plástica se convierte en una masa que se funde en la camisa debido al calentamiento de las resistencias eléctricas y el aumento de presión dentro por el transporte del material realizado por la acción de giro del tornillo helicoidal hasta ser extruido por la boquilla del dado al final de la camisa. Posteriormente se enfría el perfil extruido en una canal de agua y es cortado por una cizalla al extremo final de la máquina.

➤ **Tablero de control**

El tablero de control se encuentra a un lado derecho de la máquina y cuenta con:

- Tres reóstatos para el control de las 4 zonas de temperaturas. La zona 3 y 4 están fusionadas en un solo control.
- Interruptor y led indicador de conexión de la máquina a la red (interruptor de encendido).
- Interruptor e indicador de encendido del motor.

➤ **Temperatura**

Para la variación de temperatura se cuenta con resistencias calefactoras de 250 w en las zonas de temperatura 1, 2 y 3 y una resistencia de 200 w en la zona 4.

- El control de temperatura se realiza mediante reóstatos.
- Alta variabilidad en el parámetro de temperatura. (error de estado estacionario).
- Control realizado en las cuatro zonas de temperatura, pero las zonas 3 y 4 son controlados por un solo reóstato.
- El tiempo de espera hasta llegar a la temperatura de referencia se encuentra entre los 90 y los 120 minutos (tiempo de establecimiento)

➤ Velocidad

Para generar el movimiento del tornillo helicoidal se cuenta con motor dc el cual solo tiene como control un interruptor de encendido y apagado, éste cuenta con las siguientes características:

- Velocidad máxima de giro: 1185 rpm (Promedio)
- Voltaje de alimentación: 480
- Potencia: 37Kw

Temperatura

Para la variación de temperatura se cuenta con resistencias calefactoras de 250 w en las zonas de temperatura 1, 2 y 3 y una resistencia de 200 w en la zona 4.

3. Variadores de frecuencia

3.1 Conceptos y definiciones básicas

Variadores de frecuencia: se trata de dispositivos electrónicos, que permiten el control completo de motores eléctricos de inducción; los hay de c.c. (variación de la tensión), y de c.a. (variación de la frecuencia); los más utilizados son los de motor trifásico de inducción y rotor sin bobinar (jaula inversores (inverter). También se les suele denominar inversores (invertir) o variadores de velocidad.

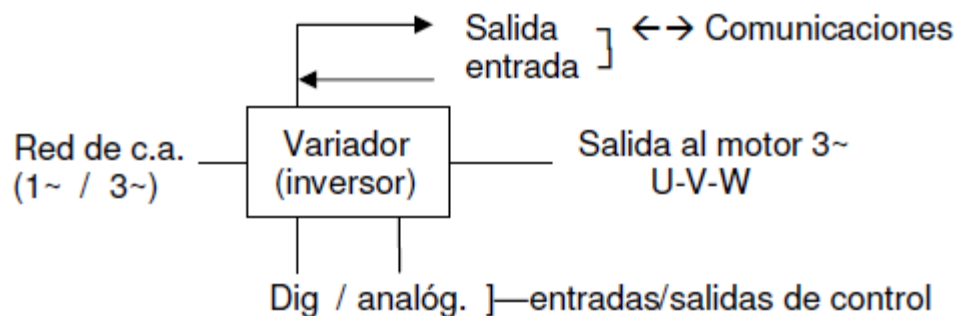


Figura 1: diagrama de entrada y salidas de un VDF

Red de suministro: acometida de c.a., monofásica en aparatos para motores pequeños de hasta 1,5 Kw (2 C.V. aprox), y trifásica, para motores de más potencia, hasta valores de 630 Kw o más.

Entradas y salidas (E/S ó I/O): diferentes conexiones de entradas y salidas de control; pueden ser digitales tipo todo o nada (contactos, pulsadores, conmutadores, contactos de relé...) o analógicas mediante valores de tensión (0...10 V o similares) e intensidad (4...20 Ma o similares). Además puede incluir terminales de alarma, avería, etc.

Comunicaciones: estos dispositivos pueden integrarse en redes industriales, por lo que disponen de un puerto de comunicaciones, por ejemplo RS-232, RS-485, red LAN, buses industriales (Profibus...) o conexiones tipo RJ-45 o USB para terminales externos y ordenadores. Cada fabricante facilita el software de control, directo o mediante bus de comunicaciones. Que permitirá el control, programación y monitorización del variador (o variadores) en el conjunto de aparatos de control empleados.

Salida: conexión al motor, generalmente de tres hilos (U-V-W) para conexión directa en triángulo o estrella según la tensión del motor.

Diagrama en bloques de un variador

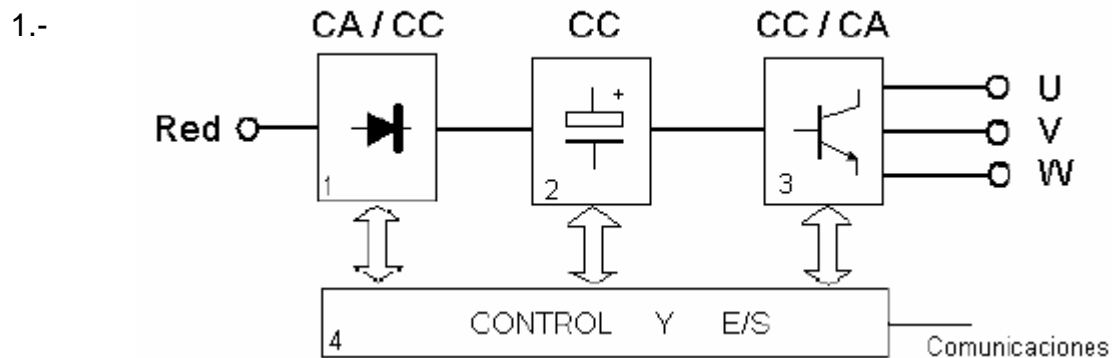


Figura 2: diagrama de bloques de un VDF

-
1. Rectificador: partiendo de la red de suministro de c.a., monofásica o trifásica, se obtiene c.c. mediante diodos rectificadores.
 2. Bus de continua: condensadores de gran capacidad (y a veces también bobinas), almacenan y filtran la c.c. rectificada, para obtener un valor de tensión continua estable, y reserva de energía suficiente para proporcionar la intensidad requerida por el motor.
 3. Etapa de salida: desde la tensión del bus de continua, un ondulator convierte esta energía en una salida trifásica, con valores de tensión, intensidad y frecuencia de salida variables. Como elementos de conmutación, se usan principalmente transistores bipolares (BJT), CMOS o similares, IGBT, tiristores (SCR), GTO... etc. Las señales de salida, se obtiene por diversos procedimientos como troceado, mediante ciclo convertidores, o señales de aproximación senoidal mediante modulación por anchura de impulsos **PWM**.
 4. Control y E/S: circuitos de control de los diferentes bloques del variador, protección, regulación... y entradas y salidas, tanto analógicas como digitales. Además se incluye el interfaz de comunicaciones con buses u otros dispositivos de control y usuario.

3.2 Ventajas y desventajas de uso del variador

A. Ventajas

- Evita picos o puntas de intensidad en los arranques del motor. (Muy pronunciados en el arranque directo, en estrella-triángulo y medios con arrancadores progresivos).
- El par se controla totalmente a cualquier velocidad, lo que evita saltos o bloqueos del motor ante la carga. (En un arrancador progresivo la regulación del par es difícil, ya que se basa en valores de tensión inicial).
- No tiene factor de potencia ($\cos \phi = 1$), lo que evita el uso de baterías de condensadores y el consumo de energía reactiva (ahorro económico).

-
- Comunicación mediante bus industrial, lo que permite conocer en tiempo real el estado del variador y el motor, así como el historial de fallos (facilita el mantenimiento).
 - Los arranques y paradas son controlados, y suaves, sin movimientos bruscos.
 - Protege completamente el motor, el variador y la línea.
 - El consumo energético se adapta a la exigencia del motor (ahorro de energía).
 - Mediante contactores externos de bypass (puente) se puede utilizar un solo variador para el control secuencial de varios motores, tanto en arranque como en parada.

3.3 Desventajas

- La instalación, programación y mantenimiento, debe ser realizada por personal cualificado.
- Si no está bien aislado (con filtros) o instalado, puede derivar ruidos e interferencias en la red eléctrica, que podrían afectar a otros elementos electrónicos cercanos.
- Para aplicaciones sencillas puede suponer mayor inversión, que un sistema simple (contactor-guardamotor), si bien a la larga se amortiza el gasto suplementario, por el ahorro energético y de potencia reactiva que aporta el variador.
- Las averías del variador, no se pueden reparar in situ (hay que enviarlos a la casa o servicio técnico). Mientras tanto debe disponerse de otro variador equivalente, o dejar la instalación sin funcionamiento.

3.4 Conceptos básicos sobre variadores para motor trifásico

Velocidad (n): la velocidad en el eje de un motor asíncrono en rpm, depende del número de polos magnéticos del motor, y la frecuencia f (Hz), de la red de suministro:

$$n = 60 \frac{f}{2p}$$

Dónde: n = velocidad en rpm

f = frecuencia de la red en Hz

2p= número de pares de polos del moto

Ejemplo, para red de 50 Hz:

2p = 1; n=3000 rpm **2p**=2; n=1500 rpm **2p**=3; n=1000 rpm...etc.

La velocidad real de giro siempre es menor que la expresada, al ser motores asíncronos. La diferencia entre n_{SINCRONA} y $n_{\text{ASINCRONA}}$, se denomina deslizamiento, (σ ó s) que se expresa en porcentaje de rpm o en valor absoluto:

$$\left. \begin{array}{l} n_{\text{SINCRONA}} = 1500 \text{ rpm} \\ n_{\text{ASINCRONA}} = 1440 \text{ rpm} \end{array} \right\} \text{Deslizamiento } \sigma = 4\% \text{ ó } 60 \text{ rpm}$$

Los motores se fabrican para una velocidad nominal o de trabajo determinada, pero mediante el variador de frecuencia dicha velocidad puede controlarse de manera progresiva. Por ejemplo, un motor de 50 Hz y 1500 rpm (4 polos), podría girar, con variación de frecuencia entre 5 y 120 Hz a velocidades comprendidas entre:

$$n = (60 \cdot 5) / 2 = 150 \text{ rpm} \quad \text{y} \quad n = (60 \cdot 120) / 2 = 3600 \text{ rpm}$$

Sobre-velocidad: el variador puede proporcionar frecuencias de salida superiores a la de trabajo del motor, lo que le hace girar a mayor velocidad que la nominal. La curva de par, para velocidad de trabajo mayor de la nominal, disminuye, de manera que con velocidad doble (200%) el par cae a la mitad del nominal.

La sobre velocidad es útil en aplicaciones que no requieren mucho par, como por ejemplo sierras de disco, pero si altas velocidades. En estos casos es importante tener en cuenta las características de par y temperatura de trabajo del motor.

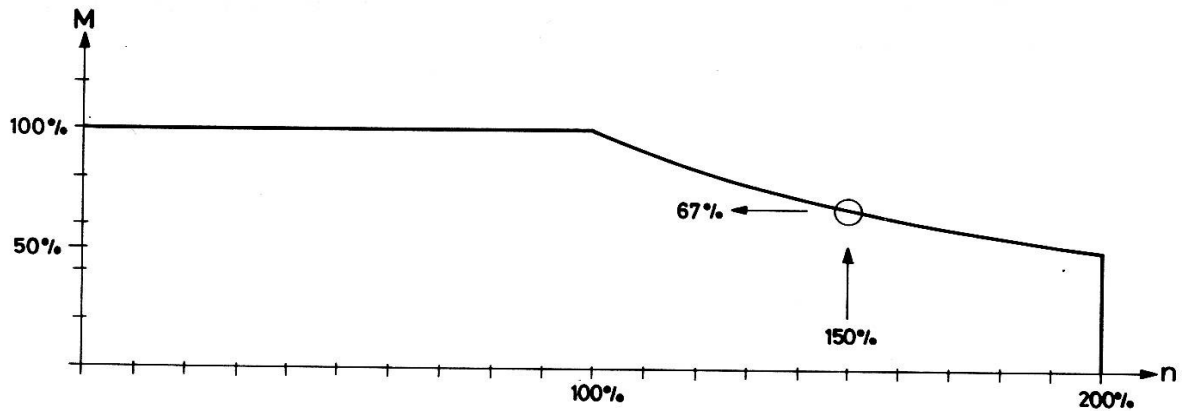


Figura 3: rampa de velocidad de un VDF

Par transmitido por el eje (par motriz): la fuerza de tracción del motor a través del eje, depende principalmente de las expresiones siguientes:

$$T = 9550 \frac{P}{n} \quad T = K \left(\frac{U}{f} \right)^2$$

Dónde: T = par motriz (también suele usarse M o Mm)

K y 9550 = constantes

U = tensión aplicada al inductor (estator)

f = frecuencia en Hz

P = potencia del motor en kW

n = velocidad (real) de giro del motor en rpm

Por otro lado, el flujo magnético en los polos del motor (Φ), depende de la tensión:

$U = K \cdot \Phi \cdot f \Rightarrow$ el flujo magnético:

$$\theta = K \left(\frac{U}{f} \right)$$

Es decir, el par depende *directamente* del flujo magnético, por lo que para obtener el control del par, hay que operar sobre este parámetro; por ello, si tenemos en cuenta las relaciones de par y velocidad:

Par constante = flujo constante, en consecuencia:

$$\frac{U}{f} = cte$$

El factor U/f tiene especial importancia en la forma de configurar un variador, ya que de ahí dependerá el par motoriz desarrollado por el motor, sin importar la velocidad de giro.

Además, de la primera expresión de T , vemos que el par es proporcional a U^2 , de manera que si U/f es constante, el par dependerá de manera directa de la tensión:
 $T \propto U^2$

Ejemplo de curvas par-velocidad para par constante:

Motor de 380V y 50 Hz, para diferentes velocidades:

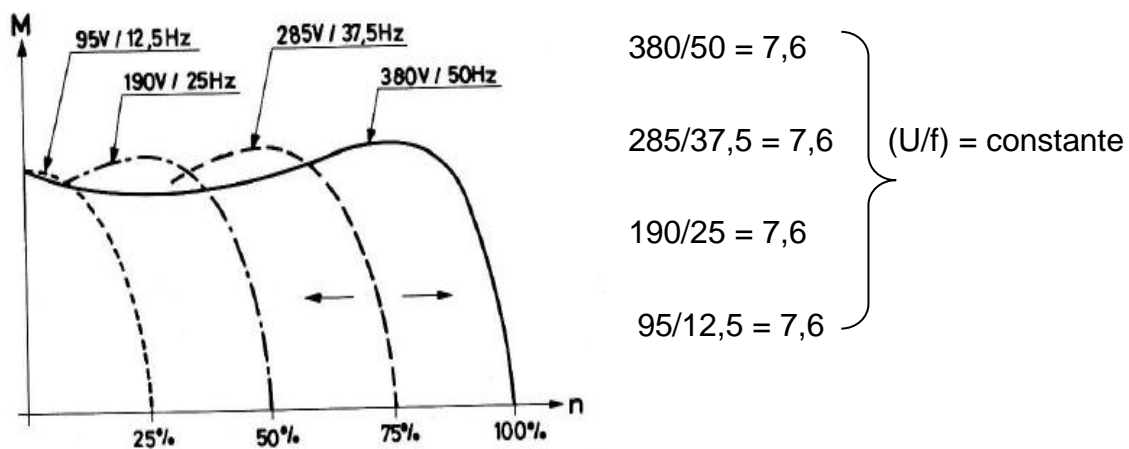


Figura 4: Curva par-velocidad para par constante

3.5 Ahorro de energía relacionado con la utilización de VDF

Actualmente mediante la utilización de variadores de frecuencia, se puede variar la velocidad de un motor, esto permite controlar la velocidad en procesos donde las necesidades de flujo sean cambiantes.

La elección de la instalación de un variador de frecuencia como método de ahorro energético supone:

- Reducción del consumo
- Control operativo, mejorando la rentabilidad y la productividad de los procesos reduciendo la velocidad de los motores cuando sea necesario.
- Minimización de pérdidas en motores e instalaciones.
- Ahorro en mantenimiento debido a que el motor trabajara siempre en las condiciones óptimas de funcionamiento.

En la actualidad se encuentran disponibles diferentes tipos de variadores de frecuencia, los que deben ser escogidos de acuerdo a la aplicación o carga que se desee controlar.

Para control de cargas de torque variable, como bombas centrífugas, ventiladores, entre otros, donde el torque varía al cuadrado de la velocidad y la potencia al cubo de la velocidad. El variador de velocidad entrega una operación segura y silenciosa sobre el arranque y la parada del motor, y una larga vida útil de los componentes eléctricos y mecánicos del sistema.

En el rango inferior de revoluciones o en el funcionamiento con cargas reducidas, resulta posible obtener un drástico ahorro de energía de hasta 60%. Un ahorro energético adicional se obtiene por medio del control óptimo de la excitación del motor. Gracias a ello, el motor es alimentado en todo momento con el flujo magnético óptimo, reduciendo así las pérdidas. Como resultado, obtenemos una efectividad máxima del motor con un grado máximo de eficiencia energética.

El variador de velocidad entrega un gran ahorro de energía en comparación con otros sistemas alternativos, como por ejemplo, válvulas reguladoras. Junto con el ahorro de energía ofrecen una eficiente manera de controlar el flujo de aire y/o agua, y un elevado nivel de confort a los usuarios de la instalación en donde éste sea utilizado.

Para cargas con torque constante grúas, molinos, correas transportadoras, entre otras, se utilizan variadores de velocidad con control directo de torque. En todas estas aplicaciones, el torque es independiente de la velocidad donde en el arranque se requiere mayor torque que el nominal.

Junto a lo anterior, se incluyen las aplicaciones de torque creciente linealmente con la velocidad, en donde la potencia varía al cuadrado de la velocidad, como son las mezcladoras y bombas volumétricas de tornillo.

Finalmente, aplicaciones con potencia constante, en donde la potencia es independiente de la velocidad, funcionamiento propio de maquinarias y sistemas de arrollamientos, como por ejemplo: rodillos, limitador de prensas, bobinador/desbobinador.

El variador de velocidad con control directo de torque ofrece intensidades de arranque más bajas, por lo tanto es posible usar fusibles más pequeños, cables de menor sección y menos gasto en energía, logrando de esta forma tener menos estrés mecánico en el motor, aumentando su vida útil.

El ahorro de energía se determina por la fracción de tiempo operando bajo un nivel de carga en particular y el período de operación bajo esas condiciones. Los ahorros más importantes los tendremos en las cargas de torque cuadrático, donde una pequeña disminución de velocidad produce una gran disminución de potencia absorbida por el motor.

4. Motores de corriente alterna

Un motor de corriente alterna es una maquina capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica rotacional para que esta sea aprovechada de forma eficiente.

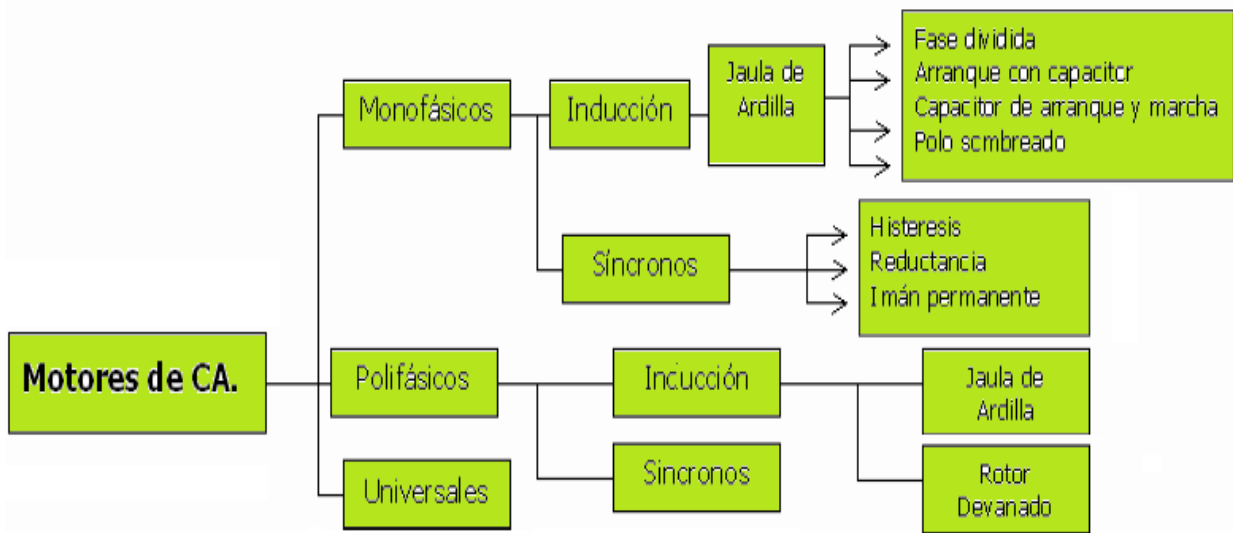


Figura 5: Clasificación de los motores

Motor asíncrono trifásico con rotor jaula de ardilla

Son probablemente los más sencillos y robustos de los motores eléctricos. El rotor está constituido por varias barras conductoras dispuestas paralelamente al eje del motor y por dos anillos conductores en los extremos.

El conjunto es similar a una jaula de ardilla y por eso se le denomina también motor de jaula de ardilla. El estator consta de un conjunto de bobinas, cuando la corriente alterna trifásica la atraviesa, se forma un campo magnético rotatorio en las proximidades del estator. Esto induce corriente en el rotor, que crea su propio campo magnético. La interacción entre ambos campos produce un par en el rotor. No existe conexión eléctrica directa entre estator y rotor.

La frecuencia de la corriente alterna de la alimentación determina la velocidad a la cual rota el campo magnético del estator.

- **Estructura del motor**

La parte fija del motor asíncrono se denomina soporte o estator. Se compone de una carcasa y un paquete de chapas con ranuras, en el que se encuentra el arrollamiento de corriente trifásica. El arrollamiento se compone de tres bobinas fijadas cada una de ellas en 120°. Los extremos del arrollamiento son conducidos al tablero de bornes situado en la caja de conexión. El rotor también está compuesto por un paquete de chapas con ranuras.

En estas ranuras se introducen barras conductoras de aluminio o cobre o se inyectan barritas moldeadas a presión de aluminio, que están conectadas a las contrahuellas mediante anillos de cortocircuito. Las barritas y los anillos de cortocircuito forman una jaula y producen el arrollamiento del rotor. La disposición inclinada de la barritas produce un movimiento uniforme.

Las diversas secciones transversales en las ranuras del rotor y de las varillas correspondientes pueden influir en el par de arranque y la corriente de arranque, es decir, en las propiedades de aceleración a plena marcha.

- **Velocidad en el campo giratorio**

Cuando se conectan los arrollamientos del motor a la red de corriente trifásica, se genera un campo giratorio en el estator que gira con la velocidad sincrónica o con la velocidad en campo giratorio n_d :

$$n_d = \frac{f_1}{p}$$

f_1 =frecuencia de red, p = número de pares de polos

Por número de pares de polos p se entiende la cantidad de pares de polos norte/sur que se forman por fase debido a la acción del arrollamiento del estator.

- **Par y deslizamiento**

El deslizamiento s se define como la diferencia entre la velocidad en el campo giratorio n_d y la velocidad del rotor n . De este modo se generan valores de deslizamiento de entre $s = 0$ (caso teórico en que la velocidad del motor coincide con la velocidad sincrónica) y $s = 1$ (parada del motor).

$$s = \frac{n_d - n}{n_d}$$

La fuerza que actúa sobre el rotor es proporcional a la corriente de inducido I_2 según la ley del conductor inundado en un campo magnético. Por lo tanto, se puede afirmar que:

$$M \approx \Theta \cdot I_2$$

Θ = flujo magnético en la división del aire del motor

La corriente de inducido aumenta a medida que se incrementa el deslizamiento (deslizamiento = velocidad relativa estandarizada) y el par M (par = fuerza x brazo de fuerza) interno que actúa sobre el rotor también aumenta.

Puntos característicos de la curva de régimen de un motor asíncrono trifásico con rotor jaula de ardilla

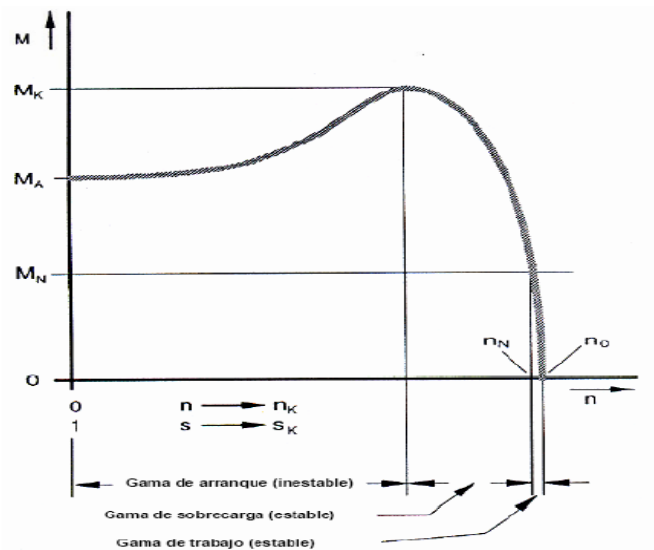


Figura 6: Motor síncrono curva de régimen

Punto de arranque:

Para ello se debe detener el rotor ($n = 0$). Conforme a la definición del deslizamiento,

$$s = \frac{n_d - n}{n_d}$$

Se encuentra en el punto de arranque del deslizamiento $s = 1$. Actúa un par de arranque M_A .

Punto de marcha en vacío:

Si el rotor gira a la misma velocidad que el campo giratorio del estator siendo $n = n_d$, la velocidad relativa y el deslizamiento son cero. En consecuencia, no hay ninguna inducción ni se genera ningún par. Por lo tanto $M = 0$.

Punto de régimen nominal

Las magnitudes más importantes de un motor son el par nominal M_N y la velocidad nominal n_N . Ambas pueden calcularse con los datos indicados en la placa de características del motor. La potencia mecánica suministrada por el árbol (potencia nominal según la placa de características) se calcula con la fórmula siguiente:

$$P_N = M_N * 2\pi * n_N$$

El punto de régimen nominal no es un punto especial en la curva característica, sino que normalmente se determina mediante la potencia perdida en régimen constante bajo carga y el exceso de temperatura relacionado con ella. El par nominal no aparece en la placa de características y, por lo tanto, debe calcularse mediante la fórmula siguiente:

$$M_N = \frac{P_N}{2\pi * n_N}$$

P_N = potencia nominal indicada en vatios (W) o Kw/1.000

n_N = velocidad nominal indicada en (S-1) o $\text{min}^{-1}/60$

Punto de inversión

Otra magnitud importante es el par de inversión M_K . Es a la vez el par máximo posible que puede generarse en los motores asincrónicos trifásicos. Si se reduce la carga, también se reducirán el ángulo de carga y el deslizamiento ($S < S_K$), pero la velocidad aumentará ($n < n_K$) . De este modo se alcanza la gama útil estable del motor asíncrono trifásico con rotor jaula de ardilla y se debe tener en cuenta que un régimen dentro de la gama de sobrecarga ($n_n > n > n_k$) o ($s_n < s < s_k$) sólo está permitido por poco tiempo, por. ejemplo., durante una fase de aceleración.

En los motores estándar, se puede afirmar que el par de inversión:

$$M_k = (2.3) \times M_N$$

El deslizamiento de desenganche K_s se encuentra entre el 5 y el 10 %, y depende básicamente del tamaño del motor.

TIPOS DE CARGAS

La primera consideración que se debe hacer al aplicar un variador de frecuencia es determinar el tipo de carga y sus características, debiendo conocer los requerimientos de Par y Velocidad.

Las cargas se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- Cargas de par Constante
- Cargas de par lineal
- Cargas de par cuadrático o variable
- Cargas de potencia constante
- Cargas de Impacto

VII. Metodología de Trabajo

En esta metodología se hace un análisis de los procesos de extrusión del plástico, los materiales y características físicas del plástico, así como los recursos financieros con los que cuenta la empresa para la implementación del nuevo sistema de automatización de la maquinaria, criterios que se tienen que considerar para poder ser aplicados.

1. Recopilación de la información

El objetivo es identificar los aspectos que permiten medir cada proceso, recopilar y clasificar los datos que afectan la calidad del producto.

Algunos datos como el arranque de las maquinas extrusoras y los consumos promedios durante el día, velocidades del motor y área de salida en la boquilla.

2. Análisis de datos y estudio técnico económico

Una vez que la información ha sido recopilada en los pasos anteriores del estudio, la información deberá ser capturada y ordenada para proceder a su análisis, datos como:

- Corriente del motor variando: Arranque, carga, velocidad de extrusión, área de salida y ahorro esperado.

Con la finalidad de identificar las áreas de oportunidad de ahorro de energía que ofrezca el cambio de sistema de arranque.

3. Análisis de problemas potenciales

Identificar cualquier problema potencial para adelantarnos a la falla y darle la solución más adecuada para evitar posibles paradas de planta innecesarias.

Realizar un diagrama de esfuerzos, que permita ver hacia dónde va el proceso, si está mejorando o empeorando

4. Búsqueda en el mercado local los convertidores de frecuencia

De acuerdo a la teoría desarrollada y a las necesidades que presente la planta se necesita la búsqueda empresas distribuidoras de convertidores de frecuencia para la evaluación de las propuestas, en cuanto a los siguientes aspectos:

- Soporte técnico
- Capacidad de adquisición de variadores
- Instalación del equipo
- Capacitación del personal en manejo, operación y programación de los variadores.
- Costo

5. Elaborar el informe del estudio para la implementación de VDF

El paso final es el de preparar un informe que contenga las observaciones y conclusiones del estudio del uso e implementación de variadores de frecuencias en máquinas extrusoras, haciendo énfasis en las oportunidades de ahorro de energía y la mejora de los procesos.

VIII. Métodos para variar la velocidad en motores trifásicos de corriente alterna

La velocidad de un motor asíncrono se determina mediante el número de pares de polos p del motor, la frecuencia de red f_1 y el deslizamiento del motor s . De aquí se derivan las diversas posibilidades de control de la velocidad de un motor.

$$n = (1 - s) \cdot f_1 / p$$

En la formula anterior se puede ver con mayor claridad las diferentes variables que se pueden manipular para hacer que la velocidad varié. En los párrafos posteriores se va a explicar cada uno de los métodos para variar velocidad en los motores asíncronos jaula de ardilla.

1. Variando la tensión

El par del motor de inducción bajo condiciones de arranque y de marcha varía con el cuadrado del voltaje aplicado al primario del estator. Para una carga determinada, reduciendo el voltaje de línea se reducirá el par con el cuadrado de la reducción del voltaje de línea, y la reducción del par producirá un incremento del deslizamiento.

Aunque reducir el voltaje de línea y el par como método de incrementar el deslizamiento servirá para controlar la velocidad hasta cierto grado en motores monofásicos de fase partida, particularmente, y en motores de inducción pequeños, en general, resulta el método menos satisfactorio de control de la velocidad para motores polifásicos, ya que el par máximo a la mitad del voltaje nominal es un cuarto del mismo a dicha tensión nominal.

Por lo tanto, no es posible obtener el par nominal, ni siquiera la mitad del mismo, porque la velocidad del motor disminuye rápidamente y éste se para antes de que pueda desarrollar el par nominal.

Entonces, para que este método funcione, es necesario que el par de carga se reduzca considerablemente a medida que se reducen el voltaje y la velocidad en el estator; por lo que funcionará de forma aceptable en un motor parcialmente cargado.

Si una carga tiene una característica par-velocidad como la mostrada en la figura 7 , la velocidad del motor puede ser controlada en un rango limitado, variando el voltaje de línea. Este método de control de velocidad se utiliza a veces para manejar pequeños motores de ventilación.

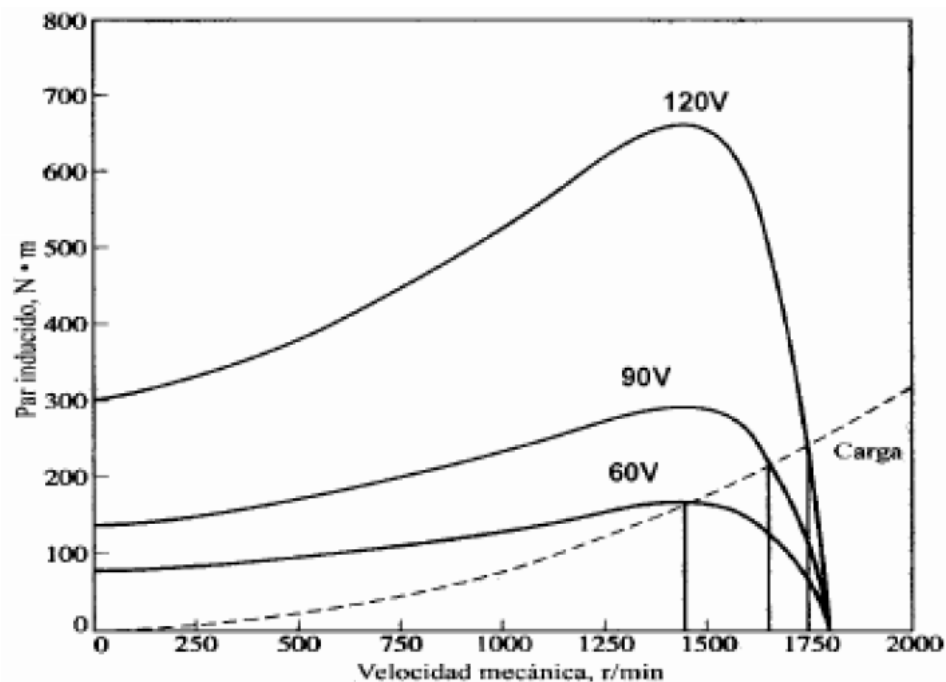


Figura 7. Control de velocidad por relación de voltaje de línea

2. Variando el número de polos

Existen dos métodos importantes para cambiar el número de polos en un motor de inducción:

- El método de polos consecuentes.
- Devanados de estator múltiples.

El primer método es antiguo (1897) y se basa en el hecho de que el número de polos en los devanados estáticos de un motor de inducción se puede cambiar con facilidad en relación 2:1 con sólo efectuar simples cambios en la conexión de las bobinas. En la figura 8 se muestra el estator de un motor de dos polos adecuado para este método.

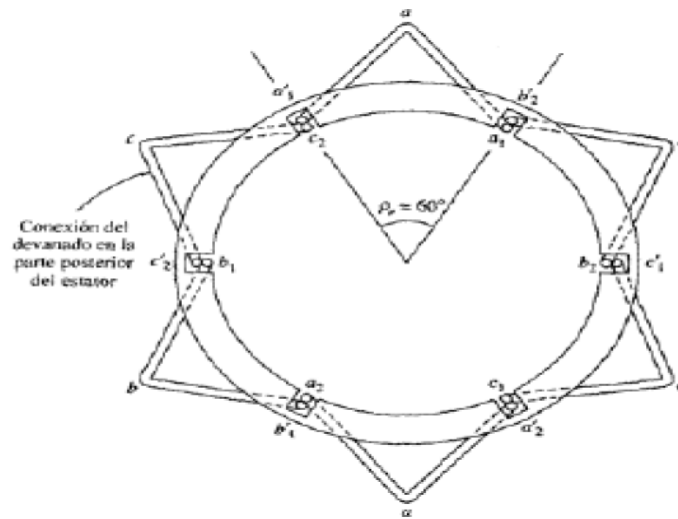


Figura 8: Devanado estáticos de dos polos para cambio de polos

Al variar los polos, se produce un funcionamiento relativamente satisfactorio puesto se ha variado el número de polos tanto del estator como del rotor. Dichos motores polifásicos de jaula y monofásicos se denominan motores de inducción de velocidad múltiple.

Estos motores poseen devanados estatóricos, específicamente diseñados para la variación de polos mediante los métodos de conmutación manual y/o automática, en que los diversos devanados estatóricos primarios se conectan en combinación serie paralelo.

Los motores de inducción de velocidad múltiple son asequibles en combinaciones de velocidad síncrona doblada o cuadruplicada, mediante la variación de polos.

En la figura 9 se puede ver cómo en una configuración de dos polos, cuando la conexión en una de las dos bobinas se invierte, los dos son polos norte y el flujo magnético retorna al estator en puntos intermedios entre las dos bobinas. Los polos sur son llamados polos consecuentes y el devanado es ahora de cuatro polos.

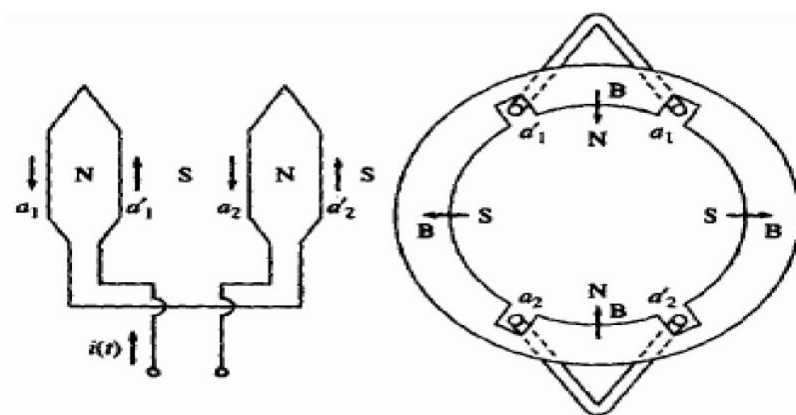


Figura 9 : Devanado de 2 a 4 polos mediante polos consecuentes

Como método de control de velocidad sólo puede utilizarse para producir velocidades relativamente fijas (600, 900, 1200 ó 1800 r.p.m.) para un motor de inducción cuya velocidad varía sólo ligeramente (del 2 al 8%) desde vacío a plena carga. La variación polar como método de control de la velocidad presenta las siguientes ventajas:

-
- Elevado rendimiento a cualquier ajuste de la velocidad.
 - Buena regulación de la velocidad para cualquier ajuste de la misma.
 - Simplicidad de control en la obtención de cualquier velocidad determinada mediante la conmutación manual o automática.
 - Reguladores de velocidad auxiliares asociados al motor relativamente baratos

La variación polar se emplea, primordialmente, donde se desee obtener la versatilidad de dos o cuatro velocidades relativamente constantes que estén ampliamente separadas. Por ejemplo, en taladradoras para perforar materiales de diferente dureza y grosor.

Sus mayores inconvenientes son:

- Se requiere un motor especial, que posea los devanados necesarios y las terminales llevadas al exterior del estator para intercambio de polos.
- No puede conseguirse un control gradual y continuo de la velocidad.

Un inconveniente del método de polos consecuentes es que las velocidades obtenidas están en relación 2:1, y no se pueden conseguir velocidades intermedias mediante los procedimientos de conmutación. Este inconveniente queda superado mediante la utilización de dos devanados independientes, cada cual creando un campo y un número de polos total independientes.

Por ejemplo, si hablamos de un motor trifásico de dos devanados, uno de ellos se bobina para cuatro polos, y el otro, para seis polos. De esta forma, el primer devanado producirá una velocidad elevada de 1800 r.p.m., mientras que el segundo, una baja de 1200 r.p.m.

Cuando el principio del motor de inducción de velocidad múltiple, de doble devanado, se combina con el método de conexión de polos consecuentes, se obtiene un total de cuatro velocidades síncronas (1800, 1200, 900 y 600 r.p.m.).

Los inconvenientes de dicho motor en comparación con el de polos subsecuentes son:

- Mayor tamaño y peso para la misma potencia de salida (puesto que sólo se emplea un devanado al mismo tiempo).
- Costo más elevado debido al mayor tamaño de la carcasa
- Mayor reactancia de dispersión porque las ranuras necesarias para los dos devanados son más profundas.
- Regulación más pobre de la velocidad debido a la mayor reactancia de cada devanado

3. Variando la resistencia del secundario

La inserción de una resistencia rotórica suplementaria produce un incremento en el deslizamiento del rotor. Este método presenta las siguientes ventajas:

- Variación de la velocidad sobre una amplia gama por debajo de la velocidad síncrona del motor.
- Simplicidad de funcionamiento, tanto desde el punto de vista manual como automático.
- Costos iniciales y de mantenimiento bajos para los reguladores manuales y automáticos.

Sin embargo, presenta los inconvenientes de:

- Bajo rendimiento, debido al aumento de las pérdidas de la resistencia del rotor (a grandes valores de deslizamiento, estas pérdidas son casi las totales, ver figura 10).
- Pobre regulación de la velocidad.

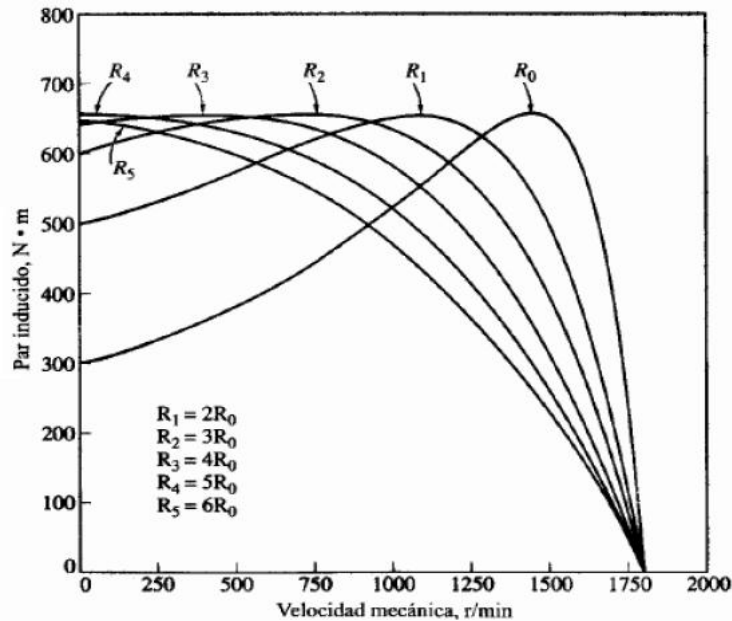


Figura 10: Control de velocidad mediante variación de la resistencia del rotor

El motor de inducción de rotor bobinado se emplea mucho con control de la resistencia secundaria para cargas de naturaleza intermitente, requiriendo par de arranque elevado y aceleración y desaceleración relativamente rápidas, tales como, grúas de fundiciones, siderúrgicas y donde una elevada corriente de arranque ocasione serias perturbaciones de la línea.

Ya que la velocidad y el deslizamiento de un motor de inducción de rotor bobinado son proporcionales a la resistencia del rotor, el método de control de la velocidad mediante la variación de la resistencia secundaria del rotor se denomina a veces control del deslizamiento.

4. Variando la frecuencia

Es uno de los métodos de control de velocidad de mejores características, se encarga de generar una tensión de frecuencia y amplitud variables a partir de la red de alimentación.

En el método de control de velocidad por variación de frecuencia, las propiedades del motor como el par de inversión y la velocidad de deslizamiento deben ser independientes de la frecuencia de alimentación con el motor bajo carga, la curva característica del par del motor debe tener siempre la misma forma. Dado que el par generado por el motor es proporcional al flujo magnético.

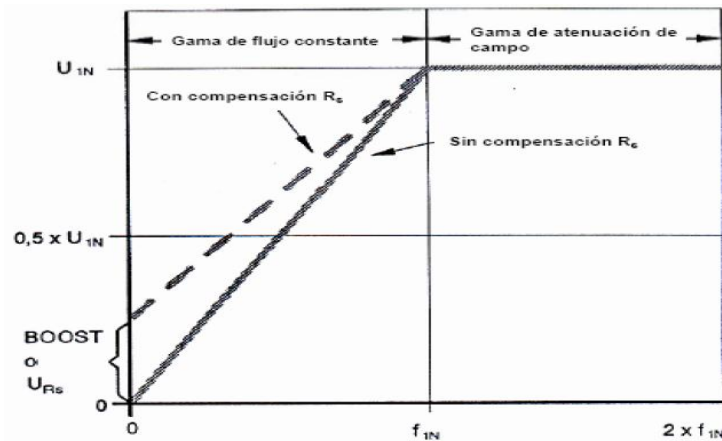


Figura 11: Curva característica U/F

En la gráfica (figura 11) se muestra la relación existente entre la frecuencia y el voltaje de alimentación, existen básicamente dos zonas, la primera es la zona de flujo constante donde existe una relación directa entre el voltaje y la frecuencia.

La segunda zona gama de atenuación de campo inicia cuando se alcanza la frecuencia nominal f_{1N} del motor, donde también alcanza la tensión nominal U_{1N} .

Si se incrementa aún más la frecuencia de alimentación no se puede seguir aumentando la tensión de alimentación ya que normalmente cuando alcanza la tensión nominal del motor, el convertidor de frecuencia está suministrando la tensión máxima.

En la figura 12 se puede ver claramente las zonas de flujo constante y atenuación de campo, en esta última se ve que el flujo es el mismo aunque la frecuencia aumente la corriente del inducido I_2 debe aumentar.

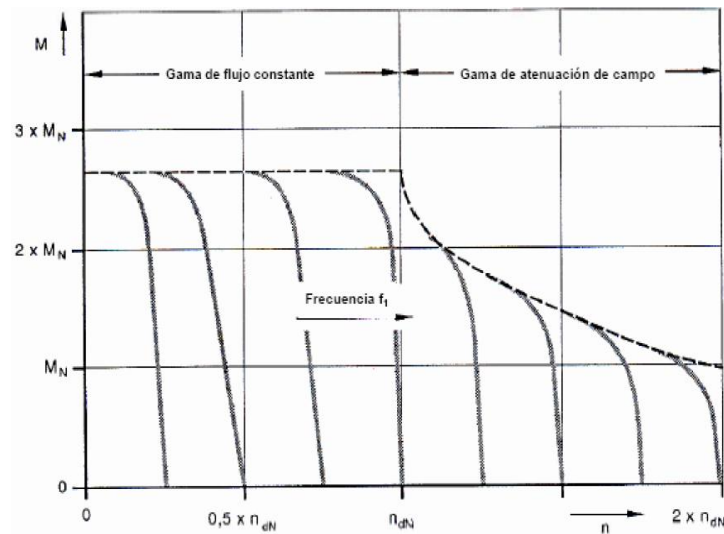


Figura 12: Curva característica por variación de frecuencia

En consecuencia en la gama de atenuación de campo se obtiene un haz de curvas características cada vez más inclinadas debido al aumento de la frecuencia.

Mientras que el par de inversión se mantiene constante en la gama de flujo constante, en la gama de atenuación de campo se reduce el cuadrado del aumento de la frecuencia.

En resumen se puede ver que la modificar la frecuencia de alimentación f_1 y reajustar correspondientemente la tensión de alimentación se puede controlar la velocidad.

De lo expuesto en los párrafos anteriores se pudo llegar a la conclusión que el método más eficiente para variar la velocidad es variar la frecuencia.

IX. Característica dinámica de los accionamientos eléctricos

Es característica del estado dinámico o transitorio la desigualdad entre el momento del motor y el de la carga que da lugar a la existencia de un momento dinámico que acelera o desacelera el conjunto motor-carga.

Desde el punto de vista del accionamiento eléctrico los aspectos más importantes a estudiar son: la estabilidad de operación ante el efecto de una perturbación externa, el comportamiento o variación de las coordenadas o variables del accionamiento en el periodo transitorio.

Cuando el accionamiento se encuentra en estado estacionario los momentos del motor y la carga son iguales y la velocidad es constante, si ocurre una perturbación externa súbita tal como un incremento de carga mecánica pueden suceder dos cosas que el accionamiento tras un periodo de tiempo más o menos breve, retorne a un estado de equilibrio a una velocidad generalmente diferente que la anterior o que la velocidad aumente o disminuya sin límites.

En el primer caso se dice que la operación del accionamiento es estable en el segundo caso es inestable.

El arranque del accionamiento eléctrico es el periodo transitorio que sucede desde que este se pone en marcha hasta que se alcanzan condiciones estables de operación.

Por frenado se entiende el periodo transitorio que ocurre desde que se envía la señal de detención hasta que se alcanza está completamente.

X. El convertidor de frecuencia

En las últimas dos décadas se ha visto un elevado desarrollo de la electrónica de potencia y de los microprocesadores desarrollos que permiten manipular la velocidad de los motores de corriente alterna en especial de los motores asíncronos jaula de ardilla.

Motores muy utilizados a nivel industrial por las bajas exigencias en el mantenimiento, por la gran robustez y por la relación peso potencia, llevando a estos motores a tener un alto rendimiento en cuanto a consumo de energía y trabajo realizado.

Los convertidores de frecuencia también llamados variadores de frecuencia (VDF) o inversores han venido a resolver el problema de poder usar los motores a velocidades variables sin disminuir mayormente la eficiencia.

- **PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO:**

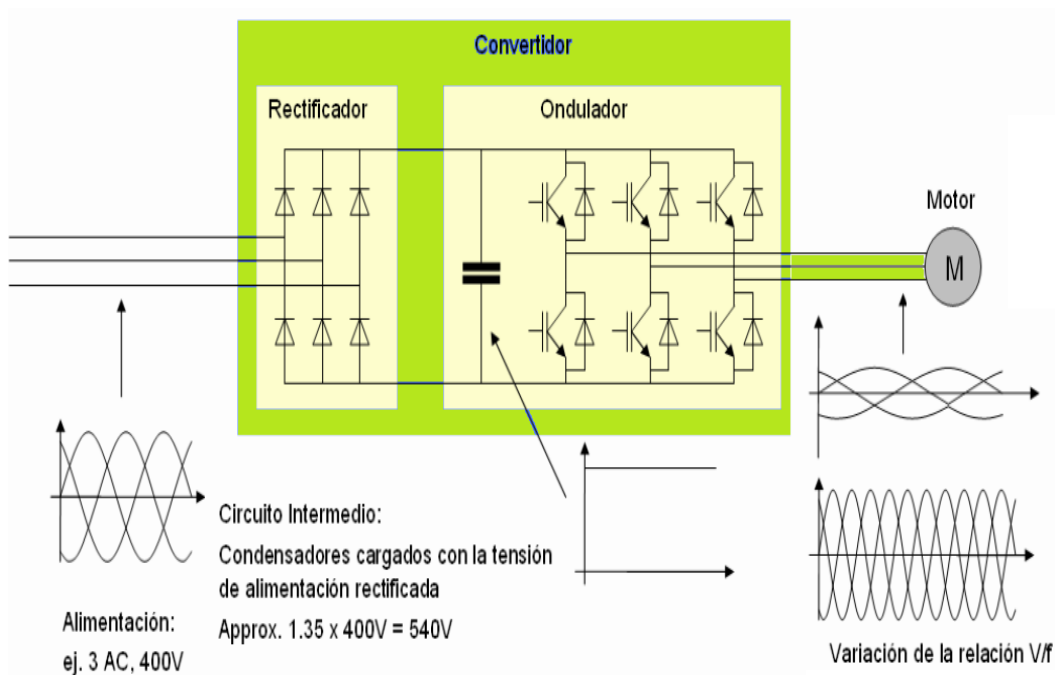


Figura 13: Esquema de un convertidor de frecuencia

Estos dispositivos entregan voltaje y frecuencia variable conforme a la necesidad del motor y la carga a él conectada. Para tal efecto toma la alimentación eléctrica de la red la cual tiene voltaje y frecuencia fija la transforma en un voltaje continuo y luego lo transforma en un voltaje alterno trifásico de magnitud y frecuencia variable por medio de un inversor. La forma de onda del voltaje de salida no es una senoide perfecta, toda vez que se entrega una señal de pulso modulada a partir de la frecuencia de conmutación de los dispositivos electrónicos de potencia.

Los equipos actuales trabajan a frecuencias de conmutación del orden de los 50 KHz, donde los contenidos de armónicos son bastante bajos por lo que se agregan filtros pasivos.

La relación voltaje frecuencia es configurada por el usuario según la aplicación, siendo las más usuales una relación lineal, la cual produce un torque constante en todo el rango de velocidades, o una relación cuadrática en donde el torque disminuye a medida que baja la velocidad.

- **Secciones de un convertidor de frecuencia**

- **Rectificador**

La función del rectificador es convertir la señal de voltaje de alimentación de CA a CD y controlar el voltaje al inversor para mantener constante la relación U/f , siendo los siguientes métodos básicos los más usados:

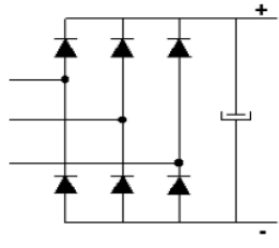
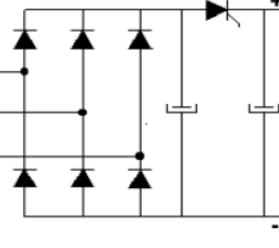
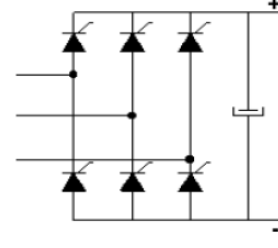
Diodos	DC Chopper	Tiristores
		
Control: No Voltaje CD: Constante Rizo CD: Bajo V/Hz: Se ajusta en Inversor Inversor: PWM FPd: Alto para todas las velocidades Armónicas: Alto Regeneración: No	Control: SCR, GTO, Transistor Voltaje CD: Variable Rizo CD: Varía V/Hz: Rectificador-Inversor Inversor: 6 pasos FPd: Se reduce con la velocidad Armónicas: Alto Regeneración: No	Control: SCR Voltaje DC: Variable Rizo CD: Varía V/Hz: Rectificador-Inversor Inversor: 6 pasos, PWM FPd: Se reduce con la velocidad Armónicas: Alto Regeneración: Sí

Figura 14: Tipos de convertidores de CA a CC

- **inversor**

El inversor utiliza dispositivos de potencia de estado sólido que son controlados por microprocesador para conmutar el voltaje del bus de CD y producir una señal de CA de frecuencia ajustable que alimenta al motor.

- **inversor de seis pasos**

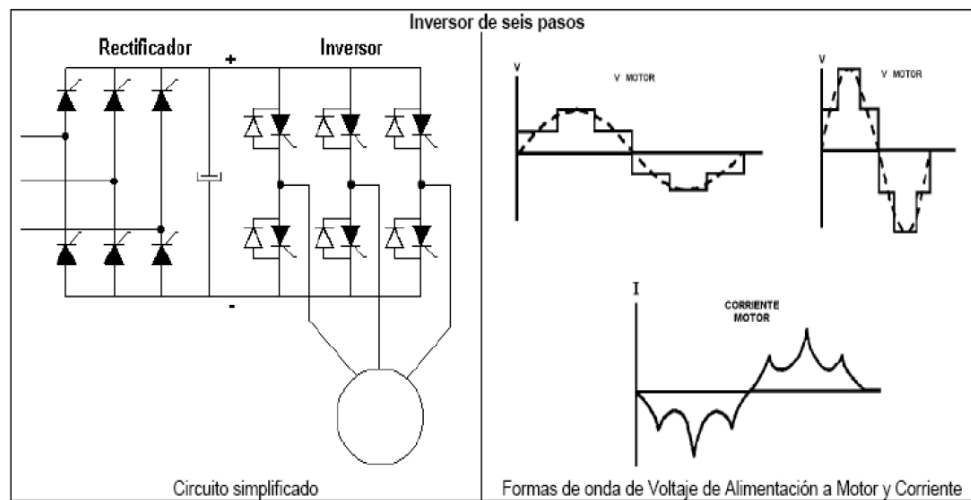


Figura 15: Inversor a base de SCR's

Para variar la frecuencia del motor, se ajusta el tiempo de conducción de los SCR's para cada uno de los seis pasos, modificando el tiempo del ciclo. El voltaje de CD se ajusta para mantener la relación U/f constante.

Cuando se utilizan SCR's en el inversor, se utilizan circuitos complejos de conmutación que no se muestran en la figura y que incluye la lógica de disparo y componentes adicionales de potencia para apagarlos que constan de capacitores, inductores y SRC's adicionales. Esta complejidad se reduce cuando se utilizan GTO's o IGBT's como interruptores de potencia.

- **inversor pwm**

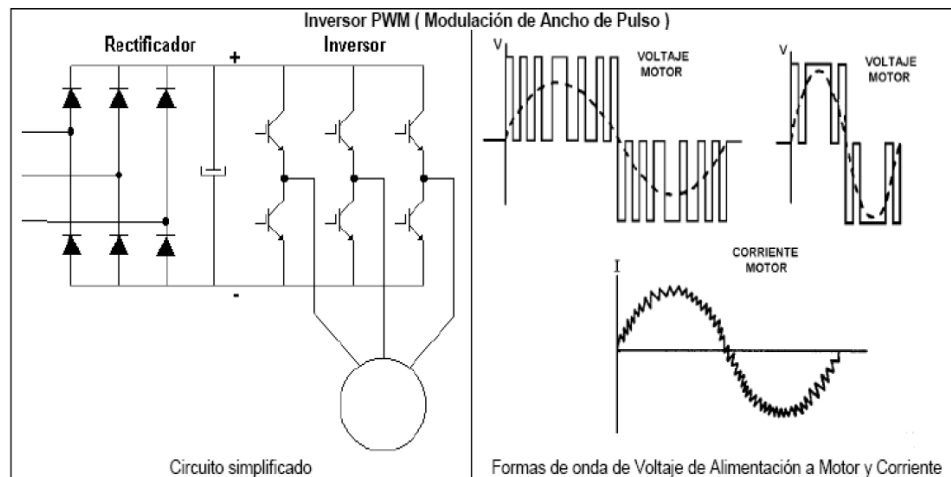


Figura 16: Inversor a base de IGBT's

El inversor consiste de seis IGBT's que se encienden y apagan en una secuencia tal que producen un voltaje en forma de pulsos cuadrados que alimentan al motor. Para variar la frecuencia del motor, el número de pulsos y su ancho se ajustan resultando en un tiempo de ciclo mayor para bajar la velocidad o tiempo de ciclo menor para subir la velocidad.

Para cada frecuencia específica hay un número óptimo de pulsos y anchos que producen la menor distorsión armónica en la corriente que se aproxime a la señal senoidal.

El cambio de voltaje requerido para mantener la relación U/f constante conforme varía la frecuencia, se realiza por medio del microprocesador de propósito dedicado que controla el ancho de los pulsos y los demás parámetros para conseguir un adecuado funcionamiento.

La distorsión armónica afecta los aislamientos del motor, incrementa su ruido audible y eleva el calentamiento entre un 5% y un 15% dependiendo del diseño del fabricante y velocidad de operación.

En conclusión conforme a la consigna de frecuencia que se otorgue al equipo, se entregara un voltaje de magnitud según la relación V/f configurada y de frecuencia conforme a la consigna, esto hará que el motor gire a una velocidad proporcional a la frecuencia.

- **variadores de tipo flujo vectorial**

Los VFD de C.A. han estado limitados a aplicaciones de par normal mientras que las aplicaciones de alto par y baja velocidad han sido el dominio de los motores de CD. Esta situación ha cambiado por la introducción de una nueva generación de la tecnología PWM, el variador de flujo vectorial.

El método de control de par usado en el VDF de flujo vectorial es similar al usado en los de CD, que incluyen un amplio rango de velocidades con una rápida respuesta. Este variador tiene la misma sección de potencia que los PWM, pero usa un sofisticado control de lazo cerrado del motor al microprocesador del variador de frecuencia.

La posición y velocidad del rotor es monitoreada en tiempo real a través de un codificador digital que determina y controla la velocidad, par y potencia del motor.

Al controlar la sección de inversión en respuesta a las condiciones actuales de la carga en tiempo real, se obtiene un control excelente del par, velocidad y potencia, así como una rápida respuesta a los cambios de carga y se consigue proporcionar el 100 % de par a velocidad 0.

La gran mayoría de fabricantes tienen VDF con tecnología enfocada al control de par más que al control de velocidad. El objetivo es controlar el par del motor en lugar de la velocidad y por lo tanto tienen respuestas más rápidas y precisas a las variaciones del par demandado por la carga.

Para lograr esto, el variador “explora” al motor haciendo un auto-reconocimiento (autotuning), en el que le inyecta corriente y voltaje para determinar su comportamiento, creando un algoritmo o modelo de sus características de funcionamiento y controlarlo de la manera más adecuada.

El reconocimiento al motor se puede realizar con carga y sin carga y al concluir se guarda en la memoria del VFD un modelo matemático del motor con el que se va a trabajar quedando respaldado incluso cuando se desconecta totalmente.

Durante la operación, el modelo recibe la información de la corriente que el motor demanda en sus 3 fases, los valores de voltaje del bus de C.D. y el estado de los transistores de potencia (IGBT). Con estos datos se calcula el flujo en el estator, el par, la frecuencia y la velocidad de cada ciclo.

El modelo estima la resistencia en el estator, obteniendo este valor mediante la comparación de los datos obtenidos de la identificación inicial y en la subsecuente operación del mismo.

La diferencia en la operación del inversor comparada con la tecnología PWM que tiene una frecuencia de conmutación fijada de acuerdo a las necesidades, mientras que en los VFD recientes la frecuencia de conmutación se modifica de acuerdo con las necesidades de par de la carga.

Este tipo de VFD es ideal para aplicaciones de una complejidad mayor, que generalmente se controlan con motores de CD como extrusoras, grúas, elevadores, máquinas de papel, y molinos entre otras.

En todas las aplicaciones de VFD anteriormente descritas hay que tener muy presentes el calentamiento que pueda llegar a sufrir el motor al disminuir la velocidad del ventilador de enfriamiento acoplado al mismo en la parte posterior.

Si el motor va a trabajar en rangos de velocidad de 0 a 30 Hz durante periodos prolongados, se recomienda instalar ventilación extra a la del motor para asegurar el enfriamiento adecuado.

XI. Sistema eléctrico actual

Arranque estrella – triángulo

El arranque de los motores que superen los 30 kW de potencia como el de las extrusoras, el laminador, el cajón alimentador se realiza con un arranque estrella triángulo mientras que los de baja potencia como las bandas transportadoras se arrancan directo de la red.

En arranque estrella triángulo, la corriente de arranque equivale aproximadamente, a la nominal del motor multiplicada por un factor de 1.3 a 2.7.

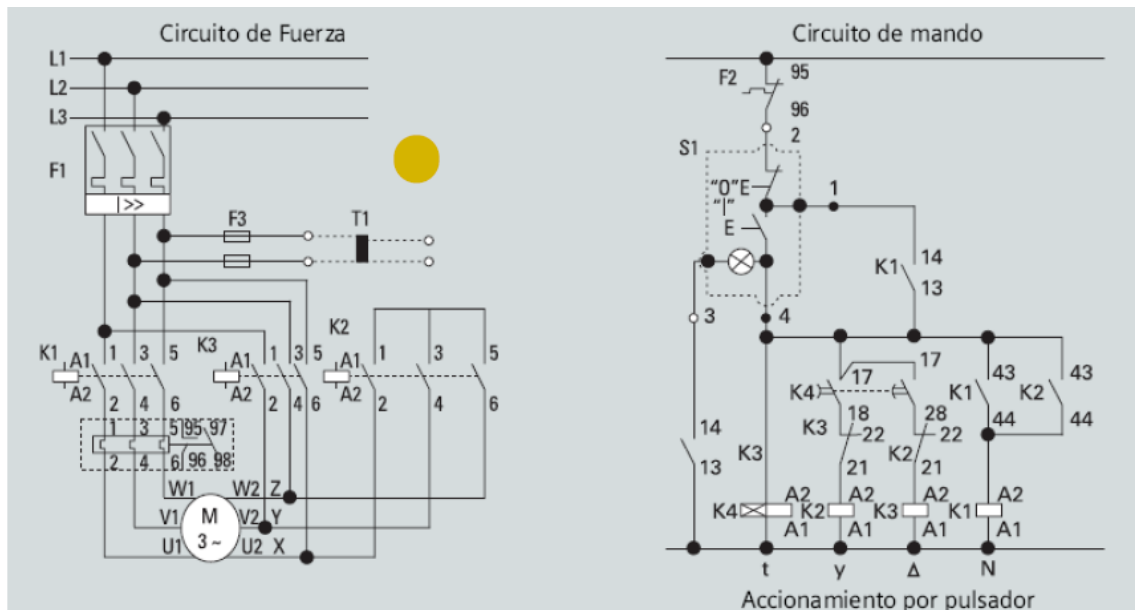


Figura 17: Diagrama de fuerza y diagrama de mando

Lo anterior significa que el par de arranque en estrella triángulo se reduce a 1/3 o 1/4 del valor a la conexión directa.

Durante el tiempo de arranque en que se establece la conexión en estrella, el par resistente tiene que ser muy inferior al par del motor. En la mayoría de ocasiones esto equivale a arrancar en vacío, o bien que el par resistente, durante el arranque de estrella, sea reducido y no aumente rápidamente.

El paso de la etapa de estrella a la etapa de triangulo solo puede efectuarse cuando el motor haya adquirido su velocidad de rotación nominal.

En el caso de los motores de gran potencia como los motores de la extrusora, se arrancan en vacío en la etapa de estrella y después de 6 seg, entra la etapa de estrella, después se acciona el embrague que es el encargado de acoplar la carga.



Figura 18: Termografía realizada a los elementos eléctricos.

La termografía de los contactores del motor de 30 (Hp) que acciona la extrusora de la línea 2 y el contactor que arranca el laminador de la misma línea se muestra en la figura anterior, la conexión es estrella-triángulo, presenta excesos de temperatura (80°C) el punto más bajo y (140 °C) el punto más alto; estos excesos de temperatura se reflejan averías en el 50% de los contactores de los circuitos de potencia de los motores.

XII. Sistema eléctrico propuesto

De acuerdo a los Ítems expuestos en el transcurso del documento, el sistema debe garantizar o resolver los siguientes inconvenientes.

- Porcentaje de rotura (material no conforme)
- Reducción de paradas por mantenimiento
- Reducción en consumos de energía tanto activa como reactiva.

Para resolver los problemas citados anteriormente se propone automatizar las líneas de producción, buscando que la materia prima no tenga considerables variaciones, se debe en primer lugar tener control sobre la dosificación de la carga.

De modo que esta sea lo más uniforme posible, en segundo lugar se debe automatizar el sistema de humectación para que la calidad no dependa del estado de ánimo del operario y por último se debe tener un dispositivo que permita regular la velocidad de extrusión.

Un problema se debe atacar principalmente

- La velocidad de extrusión.

Velocidad de extrusión

Para seleccionar la forma de reducir los porcentajes de falla en el material no conforme se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos.

1. Conseguir una velocidad óptima para llevar el proceso a tener mejores productos terminados, extruir a una velocidad que nos es la más adecuada hace que el producto varíe sus propiedades físicas causando desperfectos de fabricación los cuales solo se ven cuando el producto está terminado, el

convertidor permite buscar esta velocidad y de esta manera tener un estándar para los diferentes productos y plásticos.

2. Cuando se realiza el cambio de boquilla de un formato grande a uno pequeño se reduce la sección de salida de la boquilla aumentando la presión máxima y bajando el rendimiento de la máquina, lo cual significa que se incrementa la intensidad de reflujo y en consecuencia la cantidad de arcilla en retroceso y la cantidad de potencia eléctrica suministrada.

La mejor distribución de temperaturas y por lo tanto de esfuerzos, se presentan en la extrusora de plásticos transparente, por tener mayor área de salida y por tal motivo menor arcilla en retroceso.

La extrusora de plástico negro reduce significativamente su área de salida, por lo tanto la distribución de temperatura no es la mejor y se presentan altas temperaturas en consecuencia del mayor rozamiento existente entre el plástico empujado y el plástico en retroceso, presenta altos consumos de energía eléctrica y desgaste en los elementos mecánicos de transmisión.

1. Cuando una máquina que estaba diseñada para trabajar a su potencia nominal ha envejecido, se hace necesario realizarle ajuste para que los esfuerzos que se produzcan no sean perjudiciales.

Uno de estos parámetros es la regulación en los arranques, realizar un arranque suave reduce el golpe de ariete presente en los engranajes por cambios bruscos en la aceleración, regular la velocidad del proceso para trabajar de una forma más continua pero más suave, proporciona una disminución significativa de las averías y minimiza el número de paradas en el proceso de producción, además de conseguir mejoras en la calidad del material.

Es claro que se necesita variar la velocidad para mejorar el producto, para reducir el consumo de energía, para mejorar la disponibilidad de la máquina. Pero ¿cuál es la forma más eficiente de realizar este proceso?

Existen varios métodos de regular la velocidad los más conocidos son variando el número de polos, el voltaje y la frecuencia, estos se trataran con más detalle más adelante.

Pero en nuestro caso cuál de los tres métodos sería el más satisfactorio, y cuáles son las ventajas de cada uno de ellos.

A continuación se exponen las principales ventajas y desventajas de cada uno de los métodos más conocidos de regulación de velocidad en los motores de corriente alterna.

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Variar el número de polos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El control es muy fácil 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Voluminoso ✓ Variación de velocidad por saltos ✓ Antieconómico (mayor costo en el motor)
Variar la tensión	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Relativamente económico ✓ Fácil control 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Disminuye el par en el eje ($M \propto V^2$) ✓ Disminuye la Rigidez de la Característica Mecánica, afectando la estabilidad ✓ Disminuye el par crítico, por lo que no es recomendable a todo tipo de carga, preferentemente a cargas cuadráticas tipo ventilador ($M \propto \omega^2$)
Variar la frecuencia $\left(\frac{V}{f}\right)$	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alto diapasón de regulación ✓ Gradualidad ✓ Trabajo con cualquier tipo de carga ✓ Alta estabilidad (Rigidez Constante) ✓ Arranques y paradas suaves ✓ Posibilidad de control y comunicación. ✓ Máximo aprovechamiento de la potencia aparente. ✓ Mayor control del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Complejidad ✓ Relativamente Costo

Figura 19: Ventajas y desventajas de los métodos para variar la velocidad

1. Diagrama de instalación del variador de frecuencia por EATON

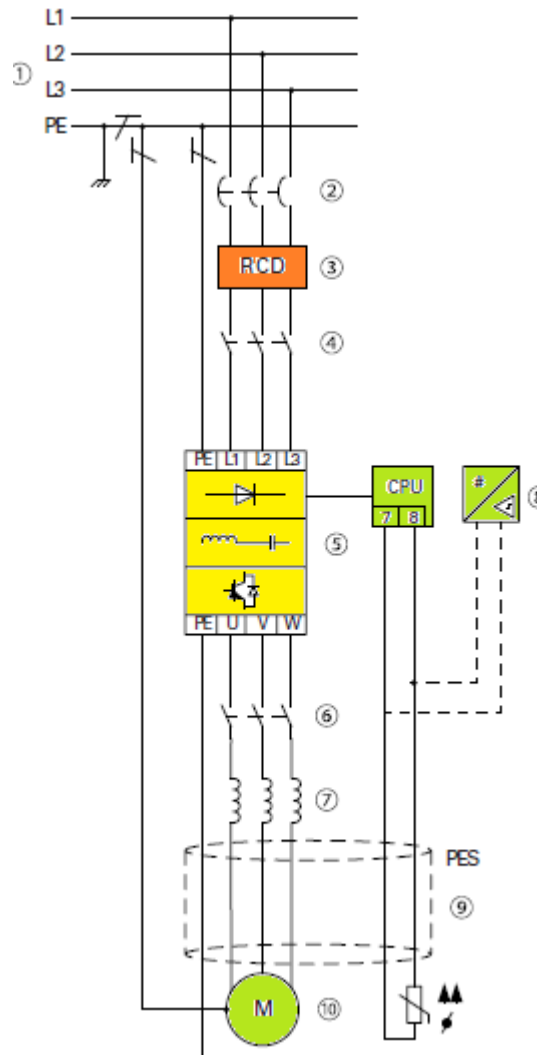


Figura 20 : diagrama de VDF

Leyenda

- 1 Power grid configuration, input voltage, input frequency, interactions with PF correction systems
- 2 Breakers, fuses, cable cross-sections
- 3 Protection of persons and animals with residual-current protective devices
- 4 Input contactor, disconnect
- 5 Frequency inverter: mounting, installation; power connection; EMC measures; circuit examples
- 6 Output contactor, disconnect
- 7 Output reactor, dV/dT filter, sine-wave filter
- 8 Motor protection; thermistor (can be connected to drive directly)
- 9 Cable lengths, motor cables, shielding (EMC)
- 10 Motor and application, parallel operation of multiple motors on a VFD, bypass circuit, DC braking

2. Variadores de frecuencia para la extrusora de plástico

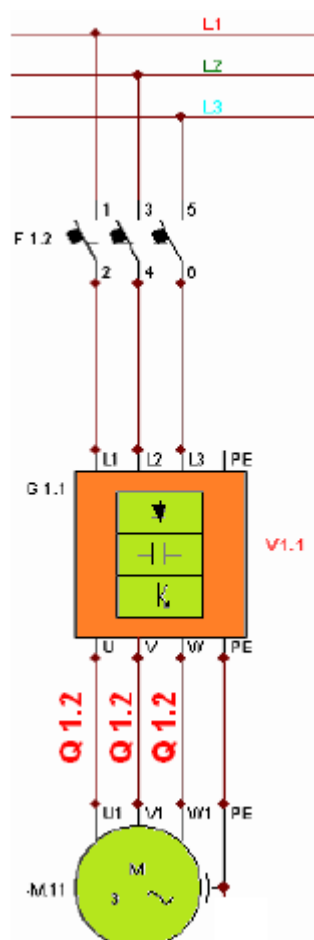


Figura 21: Diagrama de fuerza del sistema eléctrico propuesto

ANALISIS DE DATOS Y ESTUDIO ECONOMICO

La mejor forma de analizar los datos es llevarlos a un gráfico observar el comportamiento de este y compararlo con los demás datos obtenidos.

Los datos a analizar son:

➤ Corriente del motor variando:

- Arranque
- Carga
- Velocidad de extrusión
- Área de salida

➤ Material no conforme

➤ Disponibilidad.

➤ Ahorro esperado

a) **Consumos de corriente en el motor.**

➤ **Corriente de arranque**

La corriente de arranque en un motor es la que más produce armónicos y consumos excesivos de potencia reactiva en la red, la gráfica muestra el consumo de corriente en 10 segundos que es el tiempo que toma la maquina en ir de su estado de reposo a su máxima potencia.

El arranque como se había descrito en párrafos anteriores se realiza en dos fases: arranque en vacío y a plena carga.

Se ven tres picos de corriente el primero es cuando el motor arranca en estrella, un temporizador inicia el conteo y pasa a triángulo que es cuando se produce el segundo pico de corriente, a los 5.5 segundos el motor ha arrancado en vacío y ha vencido la inercia, en ese momento el operario acciona el embrague y el motor arranca a plena carga y en este punto se vuelve a presentar el tercer pico de corriente.

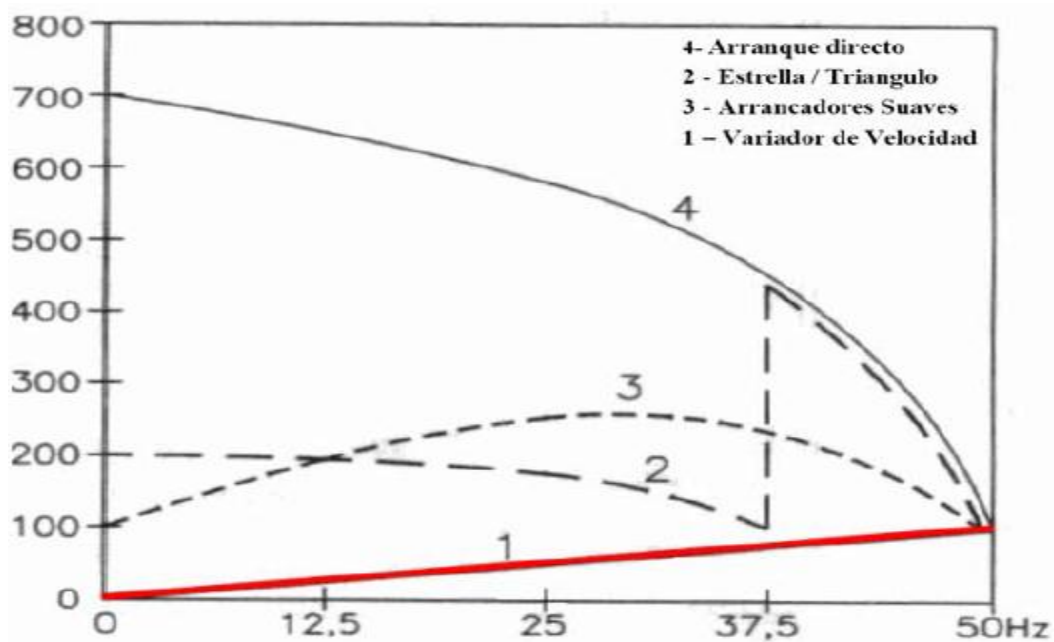


Figura 22: Gráfico comparativo de los métodos de arranque de motores trifásicos asíncronos de jaula de ardilla.

Los motores asíncronos pueden soportar perfectamente estos valores tan elevados de corriente de arranque.

Por otra parte si la red eléctrica que alimenta el motor no es muy potente en comparación con él, estos valores tan elevados de corriente de arranque provocan caídas de tensión no permisibles en las líneas de alimentación haciéndose, por lo tanto necesario reducir la corriente de arranque de estos casos.

Cuando se requiere reducir la corriente de arranque la necesidad no surge en el motor sino en la red de alimentación.

De acuerdo con esto existen dos tipos de arranque del motor asíncrono de jaula: el directo a la línea cuando la red de alimentación soporta las corrientes de arranque y a tensión reducida cuando no es necesario limitar esta corriente a causa de las caídas de tensión.

El método directo es una técnica que no tiene ningún tipo de control sobre la corriente curva 4.

El arranque estrella triángulo ofrece buen arranque pero cuando se realiza el cambio, la corriente es de 3 a 4 veces la corriente nominal.

En el gráfico se puede apreciar claramente que el método de arranque más eficiente es el que ofrece el variador de velocidad, puesto que la corriente de arranque crece de forma proporcional y no tiene grandes picos.

Para la carga mínima el consumo de corriente es de 40 (A) y para la carga máxima es de 50 (A), por lo tanto se hace necesario instalar un variador de velocidad en el cajón alimentador y en las bandas con el fin de poder tener control en la carga suministrada a la línea de moldeo y de esta forma mantener uniforme el consumo de corriente eléctrica.

Ahorro esperado

El ahorro esperado se define de acuerdo al siguiente diagrama, donde se tienen 3 ítems consumo de energía, calidad del producto y mantenimiento.

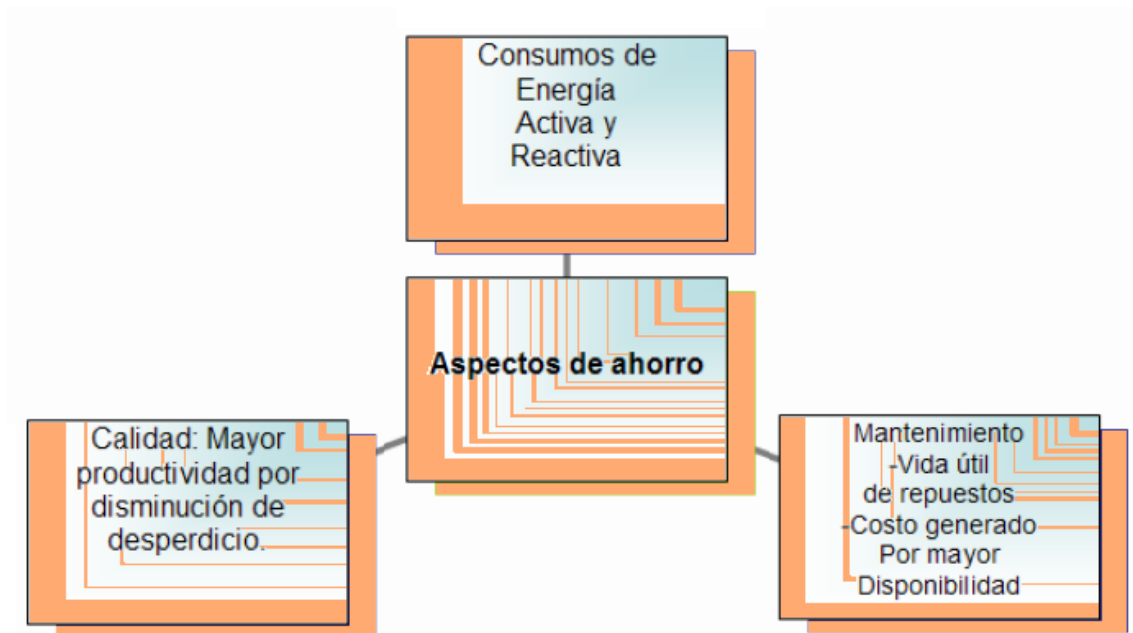


Figura 23: Propuesta de ahorro esperado

Consumos de energía

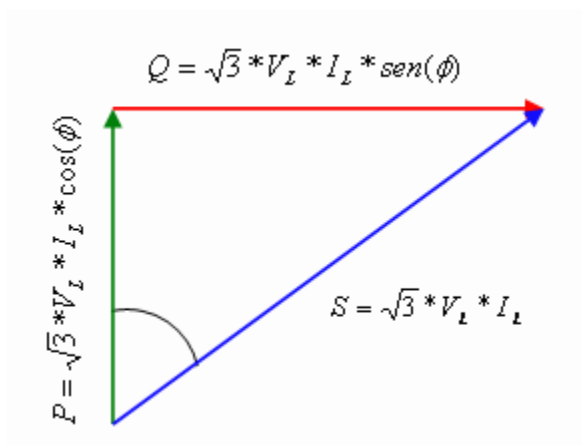


Figura 24: Triangulo de potencias

Los motores trifásicos absorben de la red potencia aparente, es la energía total de un sistema sumando vectorialmente las potencias activas y reactivas y se utiliza como unidad de medida en los equipos de gran potencia tales como plantas de emergencia, transformadores, generadores etc.

$$S = \sqrt{3} * KVA$$

La potencia activa es transformada en potencia mecánica, por lo tanto es la que realmente realiza el trabajo, su unidad de medida es el Watio y siempre está en fase con el vector tensión.

$$P = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos(\phi) \text{ KW}$$

La potencia reactiva sirve solamente para formar el campo magnético, es decir para magnetizar el motor, por lo tanto no realiza trabajo, pero está presente en el proceso físico debido a la naturaleza de las cargas.

$$Q = \sqrt{3} * V_L * I_L * \sin(\phi) \text{ KVAR}$$

3. Ahorro energético que se consigue con la aplicación de un VDF

Actualmente mediante la utilización de variadores de frecuencia, se puede controlar la velocidad de un motor, al darse éste evento se puede ajustar la velocidad en los procesos dependiendo de las necesidades, ya sea agua o aire, puesto que son fluidos no constantes.

En las pruebas realizadas con el módulo de control de un sistema del sistema de la extrusora con variador de frecuencia, se tomaron medidas con tres diferentes frecuencias de funcionamiento, demostrando el ahorro energético de la siguiente manera:

Modo de arranque	Frecuencia	Tiempo	Consumo de energía
Directo	60HZ	1 hora	22.440 Kwh
Con VDF	60HZ	1 hora	22.380 Kwh

Ahorro en consumo de energía: $22.50 - 22.38 = 0,12$ kWh.

- Tiempo de operación:
- Horas al día: 24 horas.
- Días al año: 365 días.
- Horas al año: 8760 horas al año.
- Costo del kilovatio hora según INE: 0,22 USD.

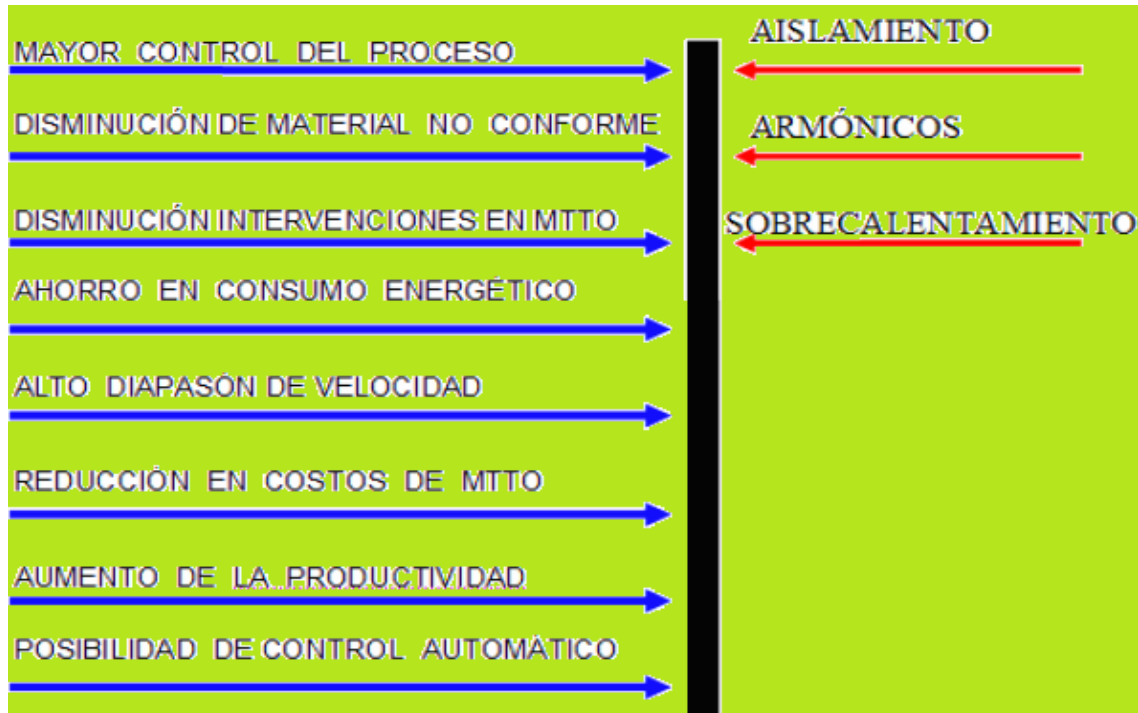
El ahorro energético obtenido al año es de: 1051,2 kWh.

El ahorro energético expresado en dólares sería de \$231,264 USD., al año, tomando en cuenta que son 6 extrusoras y que realizando el total el ahorro sería considerable.

XIII. Análisis de problemas potenciales

Cuando el problema es potencial debemos adelantarnos a la falla y darle la solución más adecuada para evitar posibles paradas de planta innecesarias.

El diagrama de esfuerzos permite ver hacia dónde va el proceso si está mejorando o empeorando



Hay tres parámetros que pueden llevar al proceso a desmejorar, el primer parámetro tiene que ver con el aislamiento.

Aislamiento

Este parámetro debe evaluarse cuando se quiere implementar un dispositivo de regulación de velocidad porque las altas pulsaciones a las que está sometido pueden dañar el aislamiento en el motor.

Cuando hablamos de aislamiento nos referimos a la resistencia que existe entre este y tierra (RTG). La RTG indica que tan sano está el aislamiento.

Para que se dé una falla a tierra, deben ocurrir 2 cosas: Primero debe crearse un camino de conducción a través del aislamiento, conforme el aislamiento envejece se fisura y posibilita que se acumule material conductor. Segundo la superficie exterior del aislamiento se contamina de material conductor y conduce suficiente corriente de la carcasa o núcleo del motor que está conectado a tierra.

La máxima temperatura de un motor depende principalmente de los materiales usados en su construcción, existen varias clases, pero los más usados son:

- **Aislamiento del motor B 130°**
- **Aislamiento del motor F 155°**
- **Aislamiento del motor H 180°**

La IEEE basa los límites de aislamiento a una temperatura de 40°C, también indica que se debe calcular la polarización Index (PI), es el valor tomado a los 10 minutos entre el valor de 1 minuto, básicamente de una indicación de la pendiente del perfil del índice de polarización; un (PI) de 2 según IEEE es aceptable para aislamientos clase B, F y H.

A. Distorsión de armónicos en las redes

La proliferación de equipos que incorporan “convertidores electrónicos de potencia”, ha dado lugar a un tipo de consumo en las redes, donde las ondas se apartan notablemente de la forma senoidal.

Decimos entonces que la corriente contiene armónicos y surgen una serie de preguntas tales como: ¿Cómo afecta la presencia de armónicos al funcionamiento de una instalación?, ¿provocan consumo de potencia?, ¿se deterioran los equipos por el hecho de existir armónicos?, ¿tiene algún coste el hecho de que haya armónicos?, ¿quién es el culpable de que existan dichos armónicos? etc. 7

B. Origen y efectos de los armónicos

El origen del problema de armónicos son los receptores que consumen corrientes distorsionadas (no senoidales). A pesar de que la tensión en origen suele ser senoidal, las caídas de tensión provocadas por dichas corrientes no senoidales hacen que en los puntos de consumo (PCC, "Point of common coupling") se tenga una tensión distorsionada y por tanto los usuarios conectados a la red distorsionada sufren los efectos de los usuarios que generan la distorsión de corriente.

La presencia de armónicos en la red tiene varias consecuencias. Las más importantes son las siguientes:

- a) Deterioro de la calidad de la onda de tensión, afectando a algunos receptores sensibles.
- b) Empeoramiento de factor de potencia. La capacidad de la red para suministrar potencia se ve limitada por ello.
- c) Sobrecarga de cables y sobre todo de transformadores (aumento muy significativo de las pérdidas en el hierro)

Para garantizar un suministro con unos límites de calidad de onda y con unas pérdidas aceptables, la distorsión de tensión debe limitarse a ciertos valores dados por normas internacionales (IEC-EN en Europa y IEEE en Estados Unidos).

Concretamente para el entorno industrial la norma europea que regula la calidad de onda de tensión en lo que a armónicos se refiere es la IEC-61000-2-4 (Niveles de compatibilidad en plantas industriales para perturbaciones conducidas de baja frecuencia).

La tabla de la figura 25 indica los límites de calidad de onda o límites de compatibilidad establecidos por dicha norma para el entorno industrial en BT. Las distintas clases mencionadas en dicha tabla corresponden a:

- Clase 1: Entorno industrial previsto para alimentación de equipos electrónicos sensibles
- Clase 2: Entorno industrial normal. Límites habituales para redes públicas
- Clase 3: Entorno industrial degradado (generalmente por la presencia de convertidores). No apto para alimentación de equipos sensibles.

Orden del armónico H	Clase 1 Un[%]	Clase 2 Un[%]	Clase 3 Un[%]
2	2	2	3
3	3	5	6
4	1	1	1,5
5	3	6	8
6	0,5	0,5	1
7	3	5	7
8	0,5	0,5	1
9	1,5	1,5	2,5
10	0,5	0,5	1
>10 múlt. de 2	0,2	0,2	1
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5
15	0,3	0,3	2
17	2	2	4
19	1,5	1,5	4
21	0,2	0,2	1,75
>21 múlt. de 3	0,2	0,2	1
23	1,5	1,5	3,5
25	1,5	1,5	3,5
>25 no múlt de 2 ni 3	0,2+12,5/h	0,2+12,5/h	$5 \times (11/h)^{1/2}$
THD(V)	5%	8%	10%

FIGURA 25: Límites de compatibilidad: Armónicos de tensión (Un%) en redes industriales de BT

El problema de armónicos tiene dos vertientes. Por un lado la compañía distribuidora debe garantizar una cierta calidad de la onda de tensión, pero por otra parte son los propios consumos de los usuarios los que deterioran dicha calidad de onda.

No obstante, no hay que olvidar que el deterioro de la onda de tensión depende de dos factores: De los armónicos de corriente consumidos por el usuario (responsabilidad del usuario) y de la impedancia de la red en el punto de distribución (responsabilidad de la compañía suministradora).

Es lógico pues que las normas IEC-61000-3-4 (Europa) y IEEE-519 (USA), que limitan la máxima cantidad de armónicos de corriente que un receptor o una instalación pueden absorber de la red, lo hagan en función de la impedancia de la red o si se prefiere de la potencia de cortocircuito, que es un índice de dicha impedancia.

La medida de la potencia de cortocircuito y de los armónicos de corriente debe hacerse en el punto de conexión a la red pública, denominado, PCC (Point of common coupling). Así pues el usuario debe interesarse por limitar las posibles distorsiones adicionales dentro de su instalación, procurando que la impedancia de su red de distribución sea lo más baja posible.

Hay que recalcar que dicha impedancia suele depender básicamente de la inductancia por metro de las líneas de distribución, parámetro que puede estar muy degradado en caso de que los cables de las distintas fases estén muy separados entre sí.

Las tablas 3-14, 3-15,3-16. dan un resumen de los límites establecidos por la norma IEC-61000-3-4 (Europa), relativos a corrientes armónicas que pueden consumir las instalaciones industriales. Para comprender dichas tablas damos a continuación algunas definiciones.

Potencia de cortocircuito cc S : Es un indicador de la impedancia propia de la red, se define como:

$$S_{cc} = \frac{U_{nom}^2}{Z_{cc}}$$

Potencia nominal del equipo equ S : Se calcula de distinta forma según el tipo de carga:

$$S_{equ} = U_{fase-N} \cdot I_{equ} \quad \text{Para equipos entre fase y neutro}$$

$$S_{equ} = U_{fase-fase} \cdot I_{equ} \quad \text{Para equipos entre fase y fase}$$

$$S_{equ} = \sqrt{3} \cdot U_{fase-fase} \cdot I_{equ} \quad \text{Para equipos trifásicos equilibrados}$$

Relación de cortocircuito sce R : Es un índice de la carga que supone un equipo en la red. Se define como:

$$R_{sce} = \frac{S_{sc}}{3S_{equ}} \quad \text{Para equipos entre fase y neutro}$$

$$R_{sce} = \frac{S_{sc}}{2S_{equ}} \quad \text{Para equipos entre fase y fase}$$

$$R_{sce} = \frac{S_{sc}}{S_{equ}} \quad \text{Para equipos trifásicos equilibrados}$$

Distorsión armónica total THD%. Se define como:

$$THD\% = 100 \cdot S_{h=2..40} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2$$

Distorsión parcial ponderada PWhD: Para la norma citada (IEC-61000-3-4) se usa la distorsión ponderada de los armónicos 14 al 40:

$$THD\% = 100.S_{h=14..40} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2$$

- El valor relativo de los armónicos pares no debe sobrepasar 16/h %
- Para valores de Rsc intermedios interpolar
- En caso de redes desequilibradas los valores de la tabla se aplican

La solución del problema no deber ser el resignarse a pagar un recargo, sino que debe evitarse este consumo adicional, con sus correspondientes pérdidas y la necesidad de ampliación de las redes de distribución.

La alternativa son los filtros de armónicos, que reducen la ondulación de la corriente a límites tolerables, para los cuales los efectos de dichos armónicos no sean significativos. Como siempre la solución es un compromiso entre la eliminación de ondulación de corriente y el coste del filtro. La eliminación total es muy costosa, pero la reducción hasta alcanzar los límites de compatibilidad es perfectamente justificable económicamente.

XIV. Conclusiones

De acuerdo a las actividades desarrolladas se presenta la necesidad de implementar un nuevo sistema eléctrico de la extrusora que permitan variar la velocidad para mejorar el proceso, la siguiente etapa debe incluir un sistema automatizado que incluya que permitan integrar el sistema y de acuerdo a las variables tomar una decisión.

La variación de velocidad gracias a los variadores de frecuencia aporta al uso racional de energía (URE).

- Se aumenta la productividad en términos de:
 - Costo de operación
 - Reducción en consumos
 - Controlen la facturación
 - Incrementar eficiencia energética
 - Recuperación de perdidas

- Se tiene mayor control en el proceso en términos de:
 - Monitoreo de consumos
 - Ajuste de la velocidad para cada tipo de arcillas
 - Mejora de arranques en los equipos

- Se realizó el estudio de la estructura y características de los variadores de frecuencia así como sus ventajas.

- Se constató el posible ahorro de energía al implementar el uso de variadores de frecuencia.

XV. Bibliografía

- Chapman, Stephen J. Máquinas Eléctricas. McGraw-Hill. 2005. Pág 382, 389, 452, 458.
- J.E Shigley y CR Mischke. "Diseño en Ingeniería Mecánica". McGraw Hill, 2002.
- ROLDÁN VILORIA José. Motores Eléctricos Automatismos de Control. Editorial Paraninfo. Madrid. 1989.
- COOPER D. William, Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición, Naucalpan de Juárez, México, Prentice Hall Hispanoamericana, octubre de 1991, Pag 280-300
- FITZGERALD A. E. Máquinas Eléctricas. Editorial Mc Graw-Hill. México. 1986.
- DANFOS, "Generalidades sobre variadores de velocidad y arrancadores suaves". [Material gráfico proyectable]. 2007.
- CREUS Antonio, Instrumentación industrial, Octava Edición, México, Alfaomega Grupo Editor, S.A. Septiembre de 2010, Pag 280-290
- Principios básicos de extrusión de plásticos, Ramos Luis Francisco. Editora Limusa México. Balderas México D.F. 2012
- ROJAS, Héctor Fabio, Instalación de un Variador de velocidad [Dispositivas]. Universidad Autónoma de Occidente 2011. 28 diapositivas.
- SABACA, Mariano (2006). Automatismos y cuadros eléctricos. McGraw Hill.
- Productos y servicios Automatización y Control Variadores de velocidad. Recuperado de <http://www.schneiderelectric.es/sites/spain/es/inicio.page>
- SIEMENS, "generalidades de motores trifásicos". Catalogo técnico.